

Формирование профиля лазерного пучка в HF-лазере с пластинчатыми электродами

А.В.Андрюманов, С.А.Кабаев, Б.В.Лажинцев, В.А.Нор-Аревян, А.В.Писецкая, В.Д.Селемир

Исследовано формирование распределения плотности энергии лазерного пучка в ближней зоне электроразрядного HF-лазера с индуктивной стабилизацией разряда и активной средой на основе SF_6 и H_2 с межэлектродными промежутками 34 и 52 мм. Электроды шириной 60 мм были образованы пластинами толщиной 1 мм и шириной 60 либо 120 мм, расположенными под углом 30° к оптической оси. Электроды шириной 30 мм образовывались пластинами шириной 60 мм, также расположенными под углом 30° к оптической оси. Исследовались распределения плотности лазерного излучения в резонаторе с плоскими зеркалами и интенсивности излучения разряда по его поперечному сечению. Профили распределений плотности лазерного излучения в ближней зоне и интенсивности свечения разряда близки по форме. Расположение электродных пластин под углом 30° позволяло значительно увеличить ширину зоны генерации. Для обоих межэлектродных расстояний ширина распределения излучения по уровню 0.5 от максимальной амплитуды составила $\sim 80\%$ ширины электрода.

Ключевые слова: электроразрядный HF-лазер, пластинчатые электроды, индуктивная стабилизация разряда, интенсивность излучения разряда, распределение лазерного излучения.

1. Введение

В последнее время получили развитие HF-лазеры на основе пластинчатых электродов с индуктивной стабилизацией разряда [1–3]. Для любого лазера характер распределения плотности его излучения в ближней зоне является одной из основных характеристик, определяющих области применения лазера. В основном профиль распределения плотности энергии лазерного пучка зависит от распределения энерговклада по поперечному сечению активного объема и типа используемого оптического резонатора. Необходимое распределение плотности энерговклада на сплошных электродах формируется с помощью подбора соответствующих профилей их рабочих поверхностей [4]. Как известно [5], применение профилированных электродов позволяет существенно уменьшить неоднородности электрического поля и увеличить эффективность HF-лазера. Для пластинчатых электродов, так же как и для сплошных, форма рабочей кромки пластин задает распределение энерговклада в рабочий объем и соответственно профиль лазерного пучка [2, 3]. Специфика электродного узла, состоящего из набора анодно-катодных пар пластин, открывает новые возможности для целенаправленного формирования профиля лазерного пучка. В качестве дополнительных возможностей для этих целей предлагается устанавливать электродные пластины под углом к оптической оси, а также использовать в одном электродном узле пластины с различными профилями рабочей кромки.

Распределение плотности лазерного излучения в ближней зоне для резонатора с плоскими зеркалами связано с распределением энерговклада по поперечному сечению активного объема. Однако непосредственно измерить распределение удельного энерговклада в активный объем не представляется возможным. Удельный энерговклад в область разряда определяет также и интенсивность его излучения в видимой области спектра. В настоящей работе предпринята попытка сопоставить распределение лазерного излучения в ближней зоне с распределением интенсивности излучения разряда по сечению активного объема.

Исследование распределения плотности энергии по сечению лазерного пучка в HF-лазере является достаточно трудоемкой задачей, которая может быть решена несколькими способами. Наиболее просто это осуществить при помощи цифровой пирозлектрической камеры «Srigicon». Существуют также специальные термически чувствительные фотопленки (бумаги), которые требуют последующего фотометрирования [6]. В настоящей работе эта задача решалась при помощи широко известного метода сканирования изображения зоны генерации с помощью диафрагмы и измерения прошедшей через нее доли энергии лазерного излучения.

Целью настоящей работы являлось исследование новых возможностей формирования профиля лазерного пучка при использовании пластинчатого электродного узла с индуктивной стабилизацией разряда в HF-лазере.

2. Экспериментальные результаты

В экспериментах использовалась разрядная камера диаметром 24 см и длиной 50 см из нержавеющей стали [2], где с помощью проходных изоляторов устанавливался электродный узел. Камера закрывалась торцевыми металлическими фланцами, на которых крепились

А.В.Андрюманов, С.А.Кабаев, Б.В.Лажинцев, В.А.Нор-Аревян, А.В.Писецкая, В.Д.Селемир. Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, Россия, 607188 Саров, Нижегородская обл., просп. Мира, 37; e-mail: mailbox@ntc.vniief.ru; web-site: http://www.vniief.ru

Поступила в редакцию 23 сентября 2004 г., после доработки – 6 декабря 2004 г.

два плоских зеркала резонатора ($R_1 = 100\%$, $R_2 = 35\%$) со световым диаметром 50 мм.

Каждый электрод состоял из ряда изолированных друг от друга медных пластин толщиной 1 мм, расположенных с определенным шагом. В работе исследовались три формы профиля рабочей кромки электродных пластин. Пластины с профилем первой формы имели ширину 60 мм и радиус рабочей кромки 200 мм (края каждой пластины были скруглены, радиус скругления составлял 8 мм). Пластины с профилем второй формы также имели ширину 60 мм и рабочую кромку с профилем Степперча, рассчитанным для промежутка 30 мм с коэффициентами $d_2 = 0.2$, $d_4 = 0.8$ [4]. Пластины с профилем третьей формы имели ширину 120 мм и такой же профиль Степперча на краях с центральной плоской частью шириной 60 мм.

На основе этих электродных пластин собиралось несколько вариантов схем электродного узла. В первом и втором вариантах 44 пластины первой (второй) формы устанавливались перпендикулярно оптической оси с шагом 6.5 мм вдоль длины электрода. В третьем варианте 27 пластин второй формы устанавливались под углом 30° к оптической оси с шагом 9.1 мм. В четвертом варианте 21 электродная пластина третьей формы устанавливались под углом 30° к оптической оси с шагом 9.1 мм. Каждая пластина катода устанавливалась в плоскости соответствующей пластины анода, причем расстояние между рабочими кромками анодных и катодных пластин могло варьироваться в диапазоне 30–50 мм.

На рис.1 показана электрическая схема лазера. Представлен вариант электродного узла с пластинами шириной 120 мм, расположенными под углом 30° к оптической оси лазера O_1O_2 . Каждая из катодных пластин Π_i подсоединена к двум общим шинам Ш_1 , Ш_2 источника накачки с помощью двух стабилизирующих индуктивностей $L_i \sim 500$ нГн каждая. Пластины шириной 60 мм подсоединялись к одной из двух общих шин с помощью одной стабилизирующей индуктивности L_i .

Высоковольтный генератор источника накачки был собран из 32 конденсаторов К15-24 (4.4 нФ \times 30 кВ) по схеме двух LC-генераторов и заряжался до напряжения ± 20 кВ с помощью двухполярного источника питания (на рис.1 показана только одна половина источника накачки). После включения разрядников $P_1 - P_4$ (РУ-73) к разрядному промежутку прикладывалось напряжение с фронтом нарастания, определяемым временем перезарядки емкостей C_0 . Для измерения напряжения на разрядном промежутке одновременно использовались два омических делителя. Один из них через три разделительных сопротивления (100 Ом) подключался к трем анод-

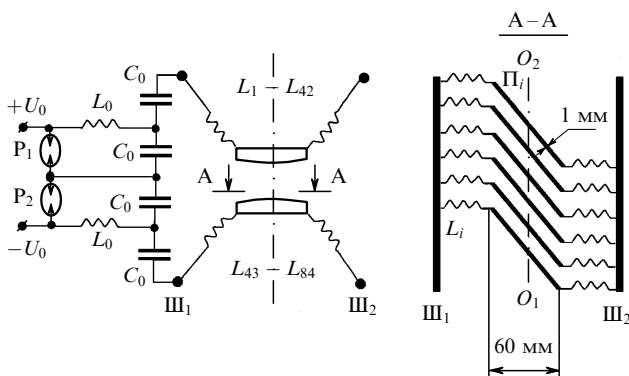


Рис.1. Электрическая схема электроразрядного химического лазера.

ным пластинам, а другой таким же образом – к трем катодным пластинам. Ток разряда измерялся малоиндуктивным шунтом. Импульс генерации регистрировался приемником ФСГ-22, охлаждаемым жидким азотом. В широком диапазоне давлений рабочей смеси вдоль оптической оси лазера наблюдался однородный диффузный безыскровой разряд, который формировался без предыонизации рабочего объема.

На рис.2 представлены характерные осциллограммы импульсов напряжения на разрядном промежутке, а также тока разряда и генерации, зарегистрированные осциллографом TDS 3054. Отчетливо наблюдается (рис.2.а) квазистационарная фаза горения разряда. Характерная квазистационарная напряженность электрического поля в межэлектродном промежутке $(E/P)_{st}$ составляла в экспериментах ~ 90 кВ·см $^{-1}$ ·атм $^{-1}$. Это значение является типичным для химического лазера [7].

Максимальная амплитуда тока разряда была равна 8.5 кА. Энергия, вкладываемая в разряд, составляла ~ 23 Дж, т.е. $\sim 70\%$ энергии, запасаемой в конденсаторной батарее. Генерация возникла примерно через 100 нс после начала накачки активной среды. Длительность импульса генерации на полувысоте составляла ~ 76 нс.

Оптическая схема экспериментов для исследования параметров HF-лазера приведена на рис.3. В экспериментах регистрировался профиль распределения интенсивности излучения разряда в видимой области спектра в поперечном сечении активного объема. Для регистрации

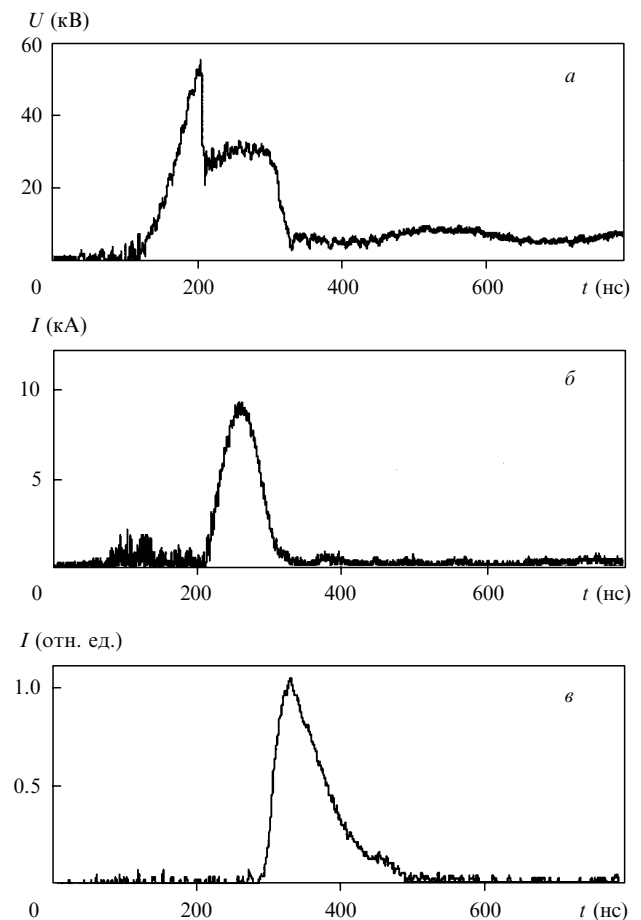


Рис.2. Осциллограммы импульсов напряжения на разрядном промежутке (а), тока разряда (б) и генерации (в) для межэлектродного промежутка 52 мм при полном давлении смеси 68 Тор. Состав смеси $\text{N}_2:\text{SF}_6 = 1:10$, зарядное напряжение $U_0 = \pm 20$ кВ.

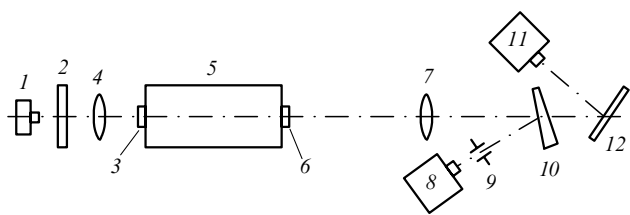


Рис.3. Схема экспериментов:

1 – цифровой фотоаппарат; 2 – светофильтр; 3 – глухое зеркало; 4, 7 – линзы; 5 – лазерная камера; 6 – выходное зеркало; 8 – пирозлектрический калориметр; 9 – диафрагма; 10 – оптический клин; 11 – термомпарный калориметр; 12 – отражающая пластина.

свечения разряда фланец с резонаторным зеркалом заменялся фланцем с оптическим окном со световым диаметром 100 мм, через которое проводилась съемка разряда цифровым фотоаппаратом Olympus C4040 Zoom. Для увеличения глубины резкости съемка проводилась в параллельных лучах с использованием линзы 4, фокальная плоскость которой находилась в центре разрядного промежутка. Объектив фотоаппарата настраивался на бесконечность. В используемой оптической схеме при перемещении плоскости, оптически сопряженной с плоскостью матрицы фотоаппарата, по всей длине разрядного промежутка масштаб ее изображения на матрице оставался постоянным (с точностью $\sim 3.5\%$). При такой оптической схеме можно корректно зарегистрировать распределение интенсивности излучения разряда по поперечному сечению активного объема.

Типичные фотографии свечения разряда в разрядных промежутках высотой $d = 34$ и 52 мм с различной конфигурацией установки электродных пластин приведены на рис.4. Видно, что разряд имеет объемный характер. Ширина разряда зависит от высоты разрядного промежутка, а также от ширины электродных пластин и угла их установки. Вблизи катода во всех режимах отчетливо наблюдаются стримеры, размеры и яркость которых возрастают при увеличении удельного энерговклада. С даль-

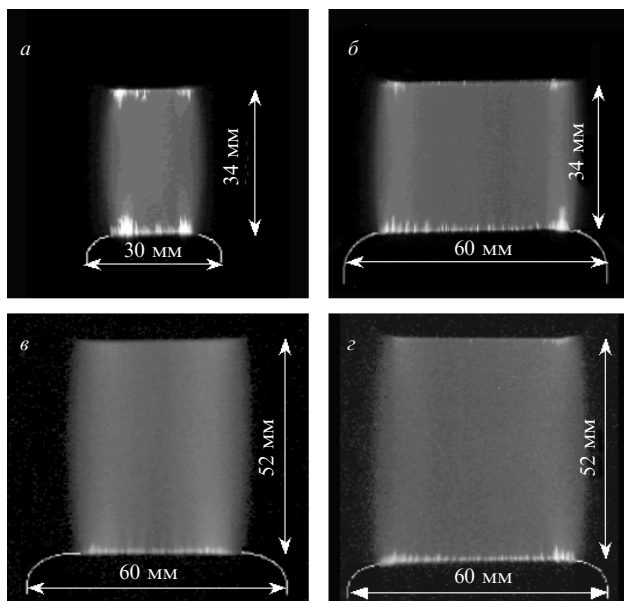


Рис.4. Фотографии свечения разряда в разрядных промежутках 34 и 52 мм при зарядном напряжении $U_0 = \pm 20$ кВ. Электродные пластины с профилем Степперча шириной 60 (а, в) и 120 мм (б, г) расположены под углами 30° (а, б, г) и 90° (в) к оси лазера, состав рабочей смеси $SF_6:H_2 = 10:1$, полное давление 84 (а, б) и 68 Тор (в, г).

5 Квантовая электроника, т.35, № 4

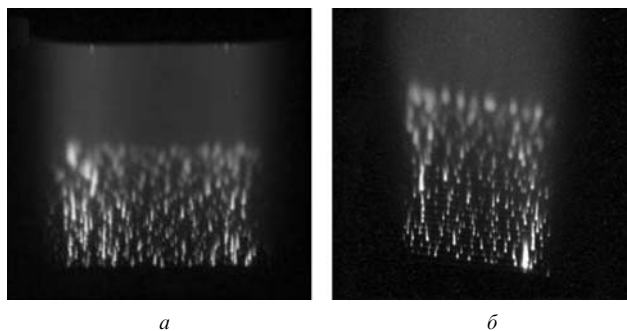


Рис.5. Фотографии свечения катодного электрода в разрядных промежутках 34 (а) и 52 мм (б). Электродные пластины с профилем Степперча шириной 60 мм установлены под углами 90° (а) и 30° (б) к оптической оси лазера.

нейшим увеличением энерговклада начинают развиваться стримеры и с анода (рис.4,а). Максимальная ширина разряда составляет около 50 мм (рис.4,г).

На рис.5 представлены типичные фотографии свечения катодного электрода для пластин, установленных перпендикулярно и под углом 30° к оптической оси лазера, на которых видна характерная структура стримеров. Стримеры возникают довольно равномерно по длине всех пластин и увеличиваются в размерах вблизи боковых сторон электродов в областях с большей напряженностью электрического поля.

Распределение плотности энергии по сечению лазерного пучка измерялось с помощью калориметров ORIEL 8 и 11 (см. рис.3). На выходное зеркало лазера устанавливался непрозрачный экран с отверстием прямоугольной формы, с помощью которого в центральной части разрядного промежутка выделялась область размером $\sim 15 \times 50$ мм. На щелевой диафрагме 10×0.3 мм с помощью линзы 7 строилось уменьшенное в 4.7 раза изображение этой области. Лазерное излучение, проходя через щелевую диафрагму, попадало на приемную площадку пирозлектрического калориметра ORIEL № 70271 (8). Термомпарным калориметром ORIEL № 70263 (11) регистрировалось излучение с не закрытой экраном области (для получения опорного значения энергии) либо полная энергия лазера при снятом экране. На рис.6 и 7 приведены результаты измерения распределения плотности J энергии лазерного излучения по ширине s межэлектродного промежутка, полученные в этих экспериментах.

На рис.7 приведены также результаты экспериментов по исследованию распределения интенсивности излучения разряда по сечению активного объема для электродных пластин на основе профиля Степперча. Интенсивности излучения, зарегистрированные отдельными пикселями матрицы цифрового фотоаппарата, усреднялись по высоте разрядного промежутка в не закрытой экраном

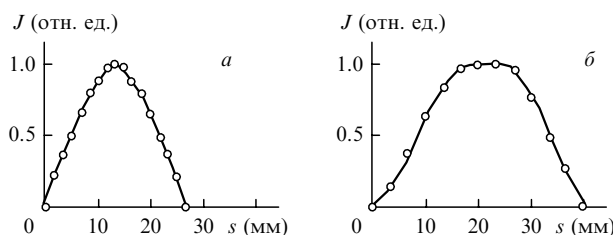


Рис.6. Распределения плотности энергии J лазерного излучения для разрядных промежутков 34 (а) и 52 мм (б) при радиусе рабочей кромки электродных пластин 200 мм.

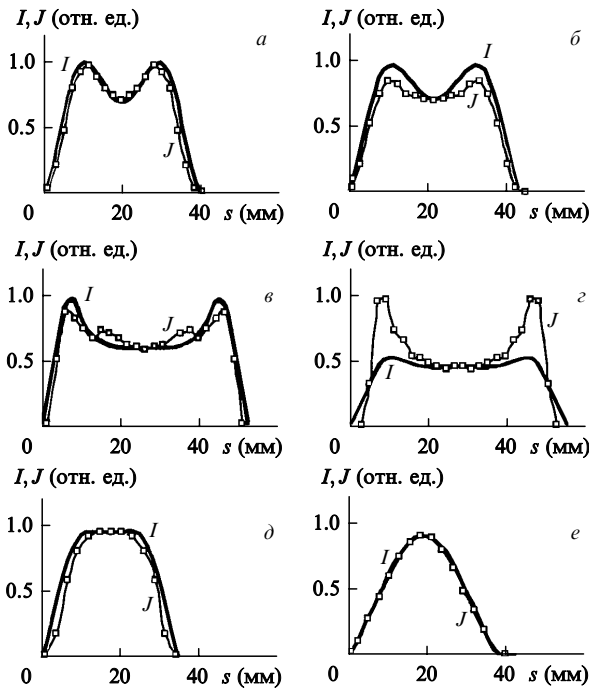


Рис.7. Распределения интенсивности излучения разряда I и плотности энергии лазерного излучения J при зарядном напряжении $U_0 = \pm 20$ кВ для разрядных промежутков 34 (а, в, д) и 52 мм (б, з, е), для которых электродные пластины на основе профиля Степперча шириной 60 (а, б, д, е) и 120 мм (в, з) установлены перпендикулярно (а, б) и под углом 30° (в–е) к оптической оси лазера.

области. Для устранения сигнала фона фотографирование проводилось в затемненном помещении. Линейность цифрового фотоаппарата проверялась с помощью набора нейтральных и цветных стеклянных светофильтров на интервале интенсивностей $I - 0.1I$. Отклонение от линейности не превышало 7%.

Конструкция электродов не позволяла выставить одинаковое расстояние между электродами для правой и левой частей межэлектродного промежутка. Различия между этими расстояниями на боковых сторонах межэлектродного промежутка во всех случаях составляло 0.20–0.35 мм. В результате распределение плотности лазерного излучения и соответственно распределение интенсивности излучения разряда были несимметричны относительно вертикальной плоскости симметрии межэлектродного промежутка. На рис.7 представлены симметризованные распределения этих величин (их средние значения на одинаковых расстояниях от указанной плоскости на правой и левой частях межэлектродного промежутка). Вид распределений определяется лишь профи-

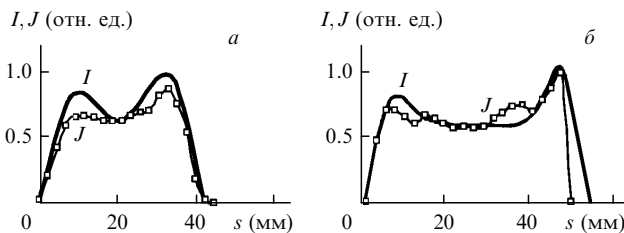


Рис.8. Несимметризованные распределения интенсивности излучения разряда I и плотности энергии лазерного излучения J для разрядных промежутков 52 (а) и 34 мм (б). Электродные пластины на основе профиля Степперча шириной 60 (а) и 120 мм (б) установлены под углами 90° (а) и 30° (б) к оптической оси лазера.

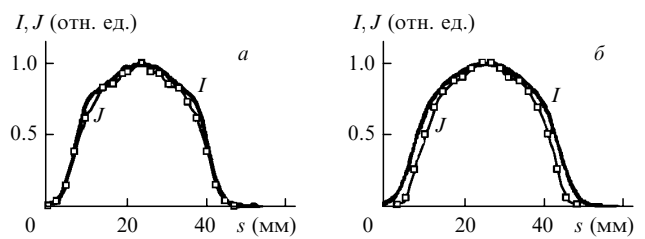


Рис.9. Распределения интенсивности излучения разряда I и плотности энергии лазерного излучения J при зарядном напряжении ± 20 кВ для разрядных промежутков 34 (а) и 52 мм (б), полученных при использовании электродных пластин на основе профиля Степперча шириной 60 мм (22 шт.) и пластин с радиусом рабочей кромки 200 мм (22 шт.).

лями рабочих кромок электродных пластин и не связан с точностью установки электродов. Для сравнения на рис. 8 приведены несимметризованные распределения.

Увеличение плотности лазерного излучения на боковых сторонах разрядного промежутка, представленного на рис.7,з, связано с режимом накопления инверсии в зоне разряда, находящейся вне резонатора лазера (размер зоны разряда $\sim 52 \times 54$ мм, световой диаметр зеркал резонатора 50 мм). Излучение из активного объема, находящегося вне резонатора, высвечивалось вследствие расходимости лазерного пучка на апертуре зеркала, что и приводило к увеличению плотности лазерного излучения вблизи края зеркала.

Использование в одной электродной системе электродных пластин с различными профилями позволяет еще более расширить возможности формирования необходимого распределения энерговода в разряде накачки и соответственно распределения плотности излучения по поперечному сечению лазерного пучка. На рис.9 представлены распределения интенсивности излучения разряда и плотности энергии лазерного излучения, полученные при использовании комбинации из 22 пластин первой группы с радиусом рабочей кромки $r = 200$ мм, и 22 пластин второй группы, образованных профилем Степперча и установленных перпендикулярно оптической оси лазера.

На рис.10 представлены распределения интенсивности излучения разряда в пяти сечениях, расположенных равномерно по высоте разрядного промежутка. Как видно из рис.10,а, распределение интенсивности излучения по высоте разрядного промежутка изменяется незначительно. Исключение составляют сечения, расположенные достаточно близко (на расстояниях ~ 5 мм) к области, занятой стримерами. Значительные различия в форме распределений, наблюдаемые на рис.10,б, связаны с существенным изменением картины электрических полей

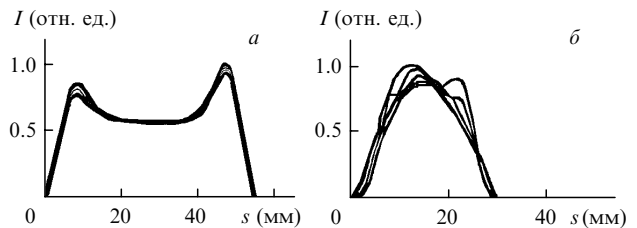


Рис.10. Распределения интенсивности излучения разряда I в пяти сечениях, расположенных равномерно по высоте разрядного промежутка. Электродные пластины на основе профиля Степперча шириной 120 (а) и 60 мм (б) установлены под углом 30° к оптической оси лазера для разрядных промежутков 34 (а) и 52 мм (б).

Табл.1.

Ширина пластины (мм)	Угол к оптической оси (°)	Профиль пластины	$d = 34$ мм				$d = 52$ мм			
			E_{cr} (Дж)	E_{lim} (Дж)	E_c (Дж)	E_{cr}/E_c	E_{cr} (Дж)	E_{lim} (Дж)	E_c (Дж)	E_{cr}/E_c
60	90	Степперча	0.71	0.27	0.83	0.86	0.77	0.09	0.69	1.12
60	90	Степперча, $r = 200$ мм	0.88	0.25	0.81	1.09	0.81	0.15	0.88	0.92
120	30	Степперча	0.71	0.15	0.78	0.91	0.53	0.06	0.58	0.91
60	30	Степперча	0.75	0.21	0.79	0.95	0.81	0.13	0.86	0.94

по высоте межэлектродного промежутка, когда расстояние между электродами (52 мм) значительно больше их ширины (30 мм).

Из рис. 7–9 видно, что распределения плотности энергии лазерного излучения и интенсивности излучения разряда довольно хорошо совпадают по форме. Как плотность лазерной энергии, так и интенсивность излучения разряда связаны с удельным энергоскладом, и достаточно хорошее подобие их распределений подтверждает возможность исследования распределения плотности энергии лазерного излучения по распределению интенсивности излучения разряда.

Были проведены расчеты энергии лазерного излучения E_c , которая может быть получена со всего активного объема. Расчеты основывались на энергии лазерного излучения E_{lim} , измеренной при ограниченной апертуре (площадью $\sim 15 \times 16$ мм) в центре разрядного промежутка, и проводились для электродных пластин с профилем Степперча и комбинации из пластин шириной 60 мм с профилем Степперча и $r = 200$ мм. Энергия лазерного излучения E_c находилась из выражения $E_c = E_{lim} \sum I / \sum I_{lim}$, где $\sum I_{lim}$ – интенсивности, просуммированные по ограниченной апертуре, а $\sum I$ – интенсивности, просуммированные по всей площади изображения разряда. Расчетные значения энергии E_c представлены в табл.1.

Далее была проведена корректировка энергии лазерного излучения E_m , измеренной калориметром с апертуры зеркал резонатора диаметром 50 мм. В случае, когда заметная часть изображения разряда не попадала в апертуру зеркала (см. распределения на рис. 7, б–г и 9, б), энергия E_{cr} находилась из выражения $E_{cr} = E_m \sum I / \sum I_s$, где $\sum I_s$ – интенсивности, просуммированные по апертуре зеркала резонатора. В результате энергия E_m , измеренная калориметром, увеличивалась на 1 % при использовании пластин шириной 120 мм ($d = 34$ мм), на 6 % при использовании пластин шириной 60 мм с профилем Степперча ($d = 52$ мм) и на 3 % в случае комбинации из пластин с профилем Степперча и $r = 200$ мм ($d = 52$ мм). Значения E_{cr} также представлены в табл.1.

Как видно из табл.1, отношение E_{cr}/E_c близко к единице для всех вариантов расположения электродов. Это говорит о возможности достаточно корректно оценивать полную энергию лазера, основываясь на значениях интенсивности излучения разряда и измеренной на ограниченной апертуре энергии лазерного излучения. В представленных экспериментах для межэлектродного промежутка $d = 34$ мм площадь ограниченной апертуры составляла от 16 % до 25 % площади изображения разряда, а для $d = 52$ мм – от 10 % до 18 %.

Проанализируем энергетические характеристики лазера, представленные в табл.1. Для $d = 52$ мм, в котором

формируется достаточно однородный разряд со слабо выраженной стримерной структурой, уменьшение ширины разряда сопровождается увеличением энергии лазерного излучения. Это говорит о недостаточной для эффективного съема инверсии плотности мощности лазерного излучения в резонаторе при достаточно больших сечениях разряда. В этом случае эффективный съем инверсии достигается увеличением длины разрядного промежутка [5]. При увеличении плотности мощности лазерного излучения за счет перехода от $d = 52$ мм к $d = 34$ мм также наблюдается увеличение энергии генерации. Этот случай реализуется для двух типов электродов – с пластинами шириной 120 мм и с комбинацией из пластин с профилем Степперча и пластин с $r = 200$ мм, в которых разряд достаточно однороден и слабо выражена стримерная структура. Для электродов из пластин шириной 60 мм с профилем Степперча, расположенных перпендикулярно и под углом 30° к оптической оси, энергия генерации меньше, чем в случае промежутка с $d = 52$ мм, что обусловлено ухудшением однородности разряда и более ярко выраженной стримерной структурой. Но и в этом случае, несмотря на довольно развитую стримерную структуру, при уменьшении ширины разряда энергия генерации увеличивается. Для электродов с комбинацией из пластин шириной 60 мм с профилем Степперча и пластин с $r = 200$ мм получена максимальная энергия генерации. Это, по-видимому, связано с тем, что в данном случае удалось установить практически одинаковую высоту разрядных промежутков по всей плоскости электродов.

3. Заключение

Проведенные исследования показали, что использование пластинчатых электродов в сочетании с индуктивной стабилизацией разряда в HF-лазерах позволяет по-новому подходить к целенаправленному изменению распределения энергосклада по поперечному сечению активного объема и профиля лазерного пучка в резонаторе с плоскими зеркалами. В дополнение к традиционному способу, основанному на подборе соответствующего профиля рабочей кромки пластин, были использованы еще несколько приемов и исследованы их возможности.

Один из этих приемов заключается в расположении электродных пластин под углом к оптической оси лазера. При одной и той же ширине электрода в таком варианте формируется заметно более широкая зона генерации, чем при расположении электродных пластин перпендикулярно оптической оси лазера. Кроме того, в одном электродном узле можно использовать пластины с различными профилями рабочей кромки. Установлено, что

в таком варианте возможна корректировка профиля лазерного пучка, в частности выравнивание плотности излучения в центральной части лазерного пучка.

В работе также показано, что по распределению интенсивности свечения разряда в видимой области спектра можно с достаточной степенью достоверности найти профиль распределения плотности энергии генерации по сечению активного объема. Это дает возможность оценивать полную энергию лазерного излучения по измерению энергии лазерного излучения, снимаемой с ограниченной апертуры, исходя из данных регистрации распределения интенсивности свечения разряда. Такой подход особенно актуален при масштабировании широкоапертурных электроразрядных лазеров [3].

1. Лажинцев Б.В., Нор-Аревян В.А. Патент России № 2105400 от 12 ноября 1996; *Изобретения*, № 5, 481 (1998).
2. Лажинцев Б.В., Нор-Аревян В.А., Селемир В.Д. *Квантовая электроника*, **30**, 7 (2000).
3. Андраманов А.В., Кабаев С.А., Лажинцев Б.В., Нор-Аревян В.А., Селемир В.Д. *Квантовая электроника*, **32**, 506 (2002).
4. Stappaers E.A. *Appl. Phys. Lett.*, **40**, 1018 (1982).
5. Панченко А.Н., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф., Бакшт Е.Х. *Квантовая электроника*, **33**, 401 (2003).
6. Аксенов Ю.Н., Борисов В.П., Бурцев В.В., Великанов С.Д., Воронов С.Л., Воронин В.В., Запольский А.Ф., Кириллов Г.А., Коваленко О.И., Лазаренко В.И., Мисько В.М., Муругов В.М., Селемир В.Д., Синьков С.Н., Фролов Ю.Н., Цыберев В.П. *Квантовая электроника*, **31**, 290 (2001).
7. Аполлонов В.В., Белевцев А.А., Казанцев С.Ю., Сайфулин А.В., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **30**, 207 (2000).