

## ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ НАКАЧКИ НА РАСХОДИМОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОГО KrF ЛАЗЕРА

А.Д. Клементов, Н.В. Морозов, П.Б. Сергеев

*Экспериментально исследована зависимость показателя преломления активной среды KrF-ЭПЛ на частоте генерации от удельной мощности возбуждения для газовых смесей Kr/F<sub>2</sub> и Ar/Kr/F<sub>2</sub>. Оценивается влияние характерных крупномасштабных неоднородностей накачки на расходимость излучения лазера.*

При решении задачи о предельной направленности лазерного излучения возникает вопрос об оптических неоднородностях активной среды и причинах, их вызывающих. Это относится и к электронно-пучковому KrF лазеру (KrF-ЭПЛ), который работает при характерных длительностях импульсов накачки порядка 100 нс. За это время газодинамические эффекты исказить однородность среды не успевают. Поэтому при работе в режиме редко повторяющихся импульсов основной причиной появления крупномасштабных оптических неоднородностей активной среды может быть лишь неоднородность удельной мощности возбуждения ( $W$ ).

Для выяснения степени влияния неоднородности  $W$  на расходимость излучения требуется определение зависимости показателя преломления  $n$  активной среды на длине волны генерации от  $W$ . Интерференционные методы определения  $\Delta n$  по своей точности наиболее пригодны для решения поставленной задачи. Однако их реализация в эксимерных лазерах из-за малой длительности импульсов сложна и требует использования уникальной техники.

В данной работе для определения связи между  $n$  и  $W$  использован неустойчивый телескопический резонатор (НТР) благодаря его относительно высокой чувствительности к оптической неоднородности типа клина между зеркалами /1/.

Эксперименты выполнялись на установке ЭЛ-1 с электронно-пучковым возбуждением газовых сред /2/. В прямоугольной системе координат по отношению к активной области (рис. 1) электронный пучок (ЭП) вводится в лазерную камеру (ЛК) перпендикулярно оптической оси резонатора, параллельной оси  $z$ . Сечение ЭП на входе в ЛК имеет размеры  $L \times 2y_0 = 23 \times 5 \text{ см}^2$ . Диаметр сечения лазерного пучка 5 см.

Детальные калориметрические измерения характеристик ЭП позволили получить следующее выражение для распределения  $W$  по объему активной области для рабочей газовой смеси (РГС) Ar/Kr = 9/1:

$$W(x,y) = 0,2\tau^{-1} p \left(1 + \frac{x}{8}\right)^{-1} \left(1 - \left[\frac{y}{2,5} \left(1 + \frac{x}{8}\right)\right]^4\right) \exp\left(-\frac{px}{12[1 + 0,01(10 - px)]}\right). \quad (1)$$

Здесь  $p$  — давление в атм;  $\tau = 75 \text{ нс}$  — длительность импульса мощности накачки на полувысоте /2/. Вдоль оси  $z$  распределение  $W$  практически однородно на длине  $L = 23 \text{ см}$ . Выражение (1) справедливо для любой РГС, но с коррекцией  $p$ . В частности, для Kr вместо  $p$  надо использовать 1,9  $p$ .

В линейном приближении зависимость  $n$  от  $W$  имеет вид:

$$n = n_0 + KW \quad \text{или} \quad K = \nabla n / \nabla W, \quad (2)$$

где  $n_0$  — показатель преломления исходной РГС на частоте лазерного излучения,  $\nabla n$  и  $\nabla W$  — модули векторов.

Согласно (1),  $\nabla W_x$  при  $y \approx 0$  имеет постоянный знак. Если выполняется (2), то аналогично должен вести себя и  $\nabla n_x$ , но это эквивалентно наличию в среде оптического клина, отклоняющего свет при однократном проходе на угол  $\alpha_1^x$ :

$$\alpha_1^x = (\nabla n_x / n) L \approx \nabla n_x L. \quad (3)$$

Использовавшийся НТР имел коэффициент увеличения  $M = 2$  при расстоянии между сферическими зеркалами 58 см. Зеркала с отражением 95% крепились в специальных оправах. На ЛК устанавливались просветленные окна из кварца КУ-1 или  $MgF_2$ .

При давлении 3 атм РГС  $Ar/Kr/F_2 = 340/38/1$  энергия излучения была 5–7 Дж с расходимостью  $\theta = 10^{-4}$  рад на уровне 1/2 максимальной интенсивности, а в угле  $4 \cdot 10^{-4}$  рад содержалась 1/2 всей энергии. Оптическая схема экспериментов по определению  $\nabla n_x$  аналогична схеме измерения  $\theta$  (рис. 2), но в фокусе зеркала 3 ставилась фотобумага. На нее фокусировалось 4% излучения, отраженного от одной грани кварцевой пластины с радиусом 20 м.

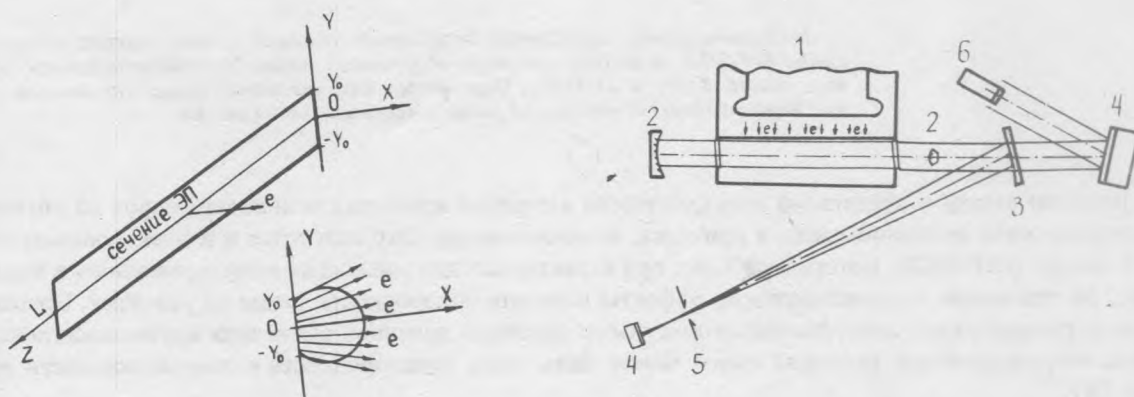


Рис. 1. Схема расположения активной области лазера по отношению к выбранной системе координат.

Рис. 2. Оптическая схема экспериментов по измерению расходимости лазерного излучения: 1 – электронная пушка и лазерная камера, 2 – зеркала НТР, 3 – кварцевая пластина, 4 – калориметры, 5 – диафрагма, 6 – коаксиальный фотоэлемент.

Для определения чувствительности НТР к оптическому клину окна на ЛК юстировались так, что образовывалась газовая призма с углом  $a_0$  при вершине. Она отклоняла свет только по оси  $y$ , а угол поворота луча при однократном проходе  $a_1^y$  составлял

$$a_1^y = a_0(n - n_{\text{возд}}). \quad (4)$$

В эксперименте из лазерного пучка щелевой диафрагмой шириной 3 мм вырезалась центральная область вдоль оси  $x$ . На фотобумаге излучение оставляло ожог с размерами  $\sim 0,1 \times 0,3 \text{ мм}^2$ . Проводилось две вспышки без смещения фотобумаги. В одной давление РГС было таким, что  $n = n_{\text{возд}}$ . Это  $\sim 0,8$  атм для  $Ar/Kr/F_2$  и  $\sim 0,5$  атм для  $Kr/F_2$ . Во второй давление было 3 атм для РГС с аргоном и 1,6 атм для РГС с криптоном.

Отпечаток на фотобумаге при большем давлении РГС смещался на  $\Delta x$  и  $\Delta y$  от опорного, полученного при низком давлении. Значения смещения связаны с параметрами установки:

$$\Delta x = \gamma_{\text{НТР}} a_1^x f, \quad \Delta y = \gamma_{\text{НТР}} a_1^y f, \quad (5)$$

где  $\gamma_{\text{НТР}}$  – абберационный коэффициент НТР первого порядка  $/l$ ,  $f = 10 \text{ м}$  – фокусное расстояние зеркала. Из (5) с учетом (3), (4) следует:

$$\nabla n_x = a_0(n - n_{\text{возд}}) (\Delta x / \Delta y) (1/L). \quad (6)$$

После определения из (1)  $\nabla W_x$  вычислялся коэффициент  $K$  по формуле (2). Было получено:  $K(\text{Ar}/\text{Kr}/\text{F}_2) = (4 \pm 2) \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{МВт}$ ;  $K(\text{Kr}/\text{F}_2) = (2 \pm 1) \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{МВт}$ .

Коэффициент  $K$  — величина положительная. Следовательно основную добавку в  $n$  вносят компоненты активной среды с поглощающими переходами  $\omega_{ik}$  в области  $\omega_{ik} > \omega_{\text{лаз}}$  или с инверсией на  $\omega_{ik} < \omega_{\text{лаз}}$ . Оценка вкладов в  $n$  различных компонент активной среды  $\text{KrF}$ -ЭПЛ привела к выводу, что основную положительную добавку в  $n$  могут вносить возбужденные и однократно ионизованные атомы аргона и криптона.

Полученное соотношение между  $n$  и  $W$  позволяет оценивать предельную расходимость излучения, достижимую на установках с известным распределением накачки. В частности, при наличии в активной среде нерегулярного поперечного  $\nabla W$ , а следовательно, и  $\nabla n$ , согласно [3] предельная расходимость в усилительном режиме

$$\theta_y = 2L \nabla n = 2LK \nabla W.$$

С НТР она будет выше на фактор  $\gamma_{\text{НТР}}$ . Можно решать и обратную задачу: определять допустимую степень неоднородности  $W$  при необходимой  $\theta$ . При этом  $N_y = \nabla W/W \leq \theta_y / 2LKW$ ,  $N_{\text{НТР}} \leq \theta_{\text{НТР}} / 2LKW \gamma_{\text{НТР}}$ .

Естественно, что эти выражения имеют место при расходимости больше дифракционной. Отметим, что для РГС из  $\text{Kr}/\text{F}_2$  требования на  $N$  из-за меньшего  $K$  получаются ниже.

Таким образом в работе определен коэффициент связи между показателем преломления активной среды  $\text{KrF}$ -ЭПЛ на длине волны генерации и удельной мощностью накачки для газовых смесей из  $\text{Ar}/\text{Kr}/\text{F}_2$  и  $\text{Kr}/\text{F}_2$ . Приведены соотношения, связывающие неоднородность накачки с расходимостью излучения при работе активной среды в режиме однопроходного усиления и с НТР.

Авторы благодарны А.З. Грасюку за ценные советы, высказанные при обсуждении результатов работы и Д.Г. Ефимову за помощь при ее выполнении.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ананьев Ю. А. Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения, М., Наука, 1979, с. 167.
2. Бучнев В. М., Клементов А. Д., Сергеев П. Б. Квантовая электроника, 8, 1235 (1981); 10, 2048 (1983).
3. Кириллов Г. А. и др. Квантовая электроника, 2, 666 (1975).

Поступила в редакцию 20 февраля 1987 г.