

# Неустойчивые резонаторы мощных химических кислородно-иодных лазеров

А.В.Савин, С.Ю.Страхов, С.Л.Дружинин

*Рассмотрены конфигурации неустойчивых резонаторов в зависимости от основных параметров мощного химического кислородно-иодного лазера и предложена конструкция неустойчивого резонатора, позволяющая компенсировать неоднородность коэффициента усиления слабого сигнала вниз по потоку активной среды, обеспечить высокую энергетическую эффективность, а также устойчивость к внутрирезонаторным абберациям. Представлена оптическая схема такого резонатора и проведен анализ его свойств на базе численного моделирования кинетики активной среды и самого резонатора в дифракционном приближении.*

**Ключевые слова:** химический кислородно-иодный лазер, неустойчивый резонатор, дифракционный расчет резонатора.

## 1. Введение

Как известно, химические кислородно-иодные лазеры (ХКИЛ) являются одними из наиболее перспективных типов газовых лазеров с точки зрения различных практических приложений. Это обусловлено следующими факторами:

- высоким удельным энергосъемом, позволяющим реализовывать мощные и в то же время достаточно компактные системы;
- возможностью создавать автономные системы, т. е. источником энергии служит химическая реакция;
- длиной волны (1.315 мкм), позволяющей создавать системы с малой угловой расходимостью и передавать излучение через кварцевый световод;
- высокой оптической однородностью активной среды (АС), а следовательно, хорошим оптическим качеством излучения.

Однако, несмотря на отмеченные достоинства, при использовании ХКИЛ имеются и определенные трудности:

- малая длина волны обуславливает высокую чувствительность лазера как к внутрирезонаторным неоднородностям типа разъюстировки, так и к дефектам оптики, а также к атмосферной турбулентности;
- распределение коэффициента усиления вниз по потоку АС неоднородно и отличается от аналогичных распределений для других типов лазеров;
- коэффициент усиления слабого сигнала АС мал, что предъявляет определенные требования к структуре оптического резонатора.

В связи с указанными особенностями одной из важнейших задач на пути создания ХКИЛ средней и высокой мощности является разработка эффективных неустойчивых резонаторов, общая теория которых и некоторые моменты реализации для ХКИЛ изложены в [1–3].

**А.В.Савин, С.Ю.Страхов, С.Л.Дружинин.** Институт лазерной техники и технологий Балтийского государственного технического университета «Военмех» им. Д.Ф.Устинова; Россия, 198005 С.-Петербург, 1-я Красноармейская ул., 1; e-mail: strakhov\_s@mail.ru

Поступила в редакцию 27 октября 2005 г., после доработки – 30 марта 2006 г.

Указанная задача особенно важна для ХКИЛ средней мощности [4], где с целью улучшения пространственных характеристик излучения при малой длине усиления необходимо обеспечить высокий коэффициент увеличения резонатора. В работах [5, 6] сделана попытка решения данной задачи путем использования гибридного резонатора, устойчивого (плоскопараллельного) в одной плоскости и неустойчивого в другой, перпендикулярной первой. Этот способ имеет ряд недостатков, например чувствительность к разъюстировкам в плоскости плоскопараллельного резонатора. Кроме того, данный способ полностью не решает проблем, связанных с малой длиной усиления и, следовательно, с малым увеличением резонатора. Предложение же использовать неустойчивые резонаторы отрицательной ветви (с перетяжкой внутри резонатора) с целью компенсации внутрирезонаторных неоднородностей приводит к значительному увеличению габаритов из-за необходимости выведения перетяжки за зону активной среды [5].

## 2. Особенности активной среды ХКИЛ с точки зрения выбора оптического резонатора

Рассмотрим особенности активной среды ХКИЛ, которые необходимо учитывать при разработке оптической схемы резонатора.

1. Активная среда ХКИЛ имеет сравнительно небольшой коэффициент усиления. Его величина определяется концентрацией активных частиц (возбужденных атомов иода), сечением резонансного взаимодействия с фотонами и шириной линии усиления.

Так, при давлении 2–3 Тор и температуре 200 К для традиционного состава активной среды (относительный расход иода составляет 2 %, степень разбавления первичным азотом равна трем [11]) коэффициент усиления слабого сигнала  $g_0 = 0.5 - 0.6 \text{ м}^{-1}$ , а ширина линии усиления определяется, в основном, доплеровским уширением. С ростом статического давления среды усиление растет, однако уже при  $P \approx 8 - 10$  Тор доминирует ударное уширение. Это означает, что ширина линии пропорциональна давлению, а рост коэффициента усиления, несмотря на рост концентрации атомов, прекращается. Характерное

значение коэффициента усиления слабого сигнала, измененное при высоком статическом давлении среды, близко к  $1 \text{ м}^{-1}$ .

С другой стороны, эффективный неустойчивый резонатор должен иметь достаточно большое увеличение  $M$ , в противном случае он очень чувствителен к вибрации зеркал. Кроме того, неустойчивый резонатор с коэффициентом увеличения, близким к единице, уже не имеет значительного преимущества перед многомодовым устойчивым резонатором с точки зрения расходимости излучения. Это означает, что при малом коэффициенте усиления слабого сигнала длина усиления должна быть достаточно большой. С точки зрения стационарной генерации интенсивность в произвольной точке внутри резонатора остается неизменной от прохода к проходу. Условие стационарности генерации можно записать следующим образом:

$$\exp(2g_0 L_{AM}) = M^2.$$

Если коэффициент увеличения резонатора равен двум, то длина АС, необходимая для возникновения генерации,  $L_{AM} = 1.4 \text{ м}$  при  $g_0 = 0.5 \text{ м}^{-1}$  и  $0.7 \text{ м}$  при  $g_0 = 1 \text{ м}^{-1}$ . Для ХКИЛ 10-киловаттного класса эти параметры могут быть достигнуты только с использованием многопроходных резонаторов.

2. Коэффициент усиления слабого сигнала  $g_0$  имеет существенную неравномерность в направлении вдоль потока. Это связано с тем, что характерные времена кинетических процессов, определяющих наработку усиления, имеют тот же порядок, что и время пребывания АС в резонаторе. Поэтому распределение  $g_0$  вдоль потока имеет вид приблизительно симметричной кривой с одним максимумом [10].

Это означает, что многопроходный резонатор должен иметь нечетное число проходов в направлении вдоль потока, поскольку в противном случае возникнет существенная неравномерность лазерной интенсивности по сечению пучка.

3. Сверхзвуковой ХКИЛ имеет достаточно высокий удельный энергозъем с единицы площади соплового блока (СБ). Здесь и далее под площадью СБ понимается площадь его поперечного сечения на входе в резонаторную полость лазера. В основном энергозъем определяется потоком синглетного кислорода, который прокачивается через СБ. Этот поток, в свою очередь, определяется давлением в генераторе синглетного кислорода (ГСК). Так, для систем низкого давления при давлении в ГСК около 30 Тор энергозъем составляет  $\sim 50 \text{ Вт/см}^2$ .

Одной из разновидностей газодинамических ХКИЛ является лазер высокого давления с эжекторным СБ [7]. Активная среда такого лазера имеет коэффициент усиления слабого сигнала в диапазоне  $0.7 - 1.0 \text{ м}^{-1}$ . Теоретически удельный энергозъем, определяемый потоком синглетного кислорода через единицу площади выходного сечения СБ, для лазеров подобного типа может достигать  $400 \text{ Вт/см}^2$  (эта величина определяется расходом кислорода через СБ; так, при давлении торможения  $P_0 = 30 \text{ Тор}$  СБ с геометрическим расширением 1:2 обеспечивает расход чистого кислорода  $3.9 \text{ г} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ , что при химической эффективности  $\eta_{\text{ch}} = 30\%$  соответствует удельному энергозjemu  $400 \text{ Вт/см}^2$ ). На практике же достигнуты значения около  $200 \text{ Вт/см}^2$  [7].

В связи с этим ХКИЛ с мощностью несколько десятков киловатт имеет сравнительно небольшой СБ. Поскольку размеры апертуры резонатора задаются системой формирования, то длина усиления также определена.

Таким образом, исходными данными для построения оптической схемы резонатора ХКИЛ являются:

- номинальная мощность;
- коэффициент усиления слабого сигнала;
- удельный энергозъем с единицы площади СБ.

К основным проектным параметрам схемы резонатора относятся коэффициент увеличения и число проходов в двух направлениях – вдоль и поперек потока.

### 3. Зависимость конфигурации неустойчивого резонатора от основных параметров ХКИЛ

Зададим для ХКИЛ 10-киловаттного класса коэффициент увеличения, равный 2.5. Поскольку такой коэффициент увеличения обеспечивает компактность апертуры и малую чувствительность резонатора к абберациям, дальнейшие выкладки будем производить для этого значения. Ему будет соответствовать минимальная длина усиления, при которой лазер еще будет работать: для  $g_0 = 0.5 \text{ м}^{-1}$  эта длина составляет  $\sim 180 \text{ см}$ , а для  $g_0 = 1 \text{ м}^{-1}$  она равна  $\sim 90 \text{ см}$ . При этом коэффициент увеличения резонатора, обеспечивающий эффективный энергозъем, будет составлять  $\sim 1.7$ . Тогда несложно оценить общее число проходов излучения в резонаторе по следующему алгоритму. Зная требуемую мощность лазера, энергозъем и размер апертуры, определяем длину СБ как отношение требуемой мощности к произведению энергозъема с единицы площади СБ и размера апертуры. Далее находим необходимое число проходов как отношение требуемой длины усиления (для  $g_0 = 0.5 \text{ м}^{-1}$  она составляет  $\sim 180 \text{ см}$ , а для  $g_0 = 1 \text{ м}^{-1}$  – около  $90 \text{ см}$ ) к длине СБ. Результаты оценок приведены в табл.1. Они показывают, в частности, следующее.

При мощности 10 кВт в приемлемой схеме резонатора, которая может быть построена для ХКИЛ низкого давления, излучение совершает три прохода, а размер апертуры равен 3 см. При этом длина СБ составляет  $\sim 180 \text{ см} / 3 = 60 \text{ см}$  (именно длина усиления  $180 \text{ см}$  соответствует пороговому коэффициенту увеличения 2.5). Конструктивно такой СБ может быть выполнен с попереч-

Табл.1. Общее число проходов лазерного излучения в неустойчивом резонаторе.

Размер апертуры (см)	Мощность (кВт)	Число проходов излучения в резонаторе		
		I	II	III
3	10	3	6	11
	30	1	2	4
	50	1	1	2
4	10	4	7	15
	30	1	2	5
	50	1	1	3
6	10	5	11	22
	30	2	4	7
	50	1	2	4

Примечание. Для числа проходов излучения в резонаторе (колонки I, II и III соответственно) удельный энергозъем составляет 50, 200 и  $400 \text{ Вт/см}^2$ , коэффициент усиления равен 0.5, 1 и  $1 \text{ м}^{-1}$ .

ным размером 6 см и длиной 60 см / 2 = 30 см. Тогда излучение в резонаторе будет совершать два прохода в направлении поперек потока и три – вдоль потока. Общая длина АС вдоль потока в этом случае составляет 9 см.

Резонаторы с апертурой 6 см эффективно работают при больших мощностях ХКИЛ. Так, с СБ низкого давления в диапазоне мощностей 17–20 кВт эффективно работает трехпроходный резонатор (см. табл.2). Общая длина усиления равна ~180 см, длина СБ – примерно 180 см/3 = 60 см. Длина резонаторной полости вдоль потока в такой трехпроходной системе составляет 6 × 3 = 18 см. Ее можно уменьшить в 1.5 раза – до 12 см, если применить Z-образную схему резонатора.

Для ХКИЛ мощностью 50–60 кВт может быть построен однопроходный резонатор с СБ низкого давления. При этом размеры СБ составят 6 × 180 см.

Трехпроходный резонатор с СБ высокого давления подходит для уровня мощности 35 кВт. Длина усиления составляет ~90 см, длина СБ равна ~90 см/3 = 30 см. Таким образом, имеем СБ с размерами 6 × 30 см. Длина активной зоны вдоль потока равна 6 × 3 = 18 см. Конструкция с такими параметрами применима для высокоскоростной АС, создаваемой СБ высокого давления. Увеличение удельного энергосъема до 400 Вт/см<sup>2</sup> позволит построить эффективные лазерные установки мощностью до 70 кВт с трехпроходным резонатором.

Интересный результат дает подобный качественный анализ для размера апертуры 10 см (табл.3). В этом случае активная среда не позволяет построить резонатор с числом проходов вдоль потока, бóльшим одного, поэтому выбор схемы резонатора становится практически однозначным.

Так, в лазерах с номинальной мощностью 80–100 кВт может нормально работать однопроходный резонатор в сочетании с ХКИЛ низкого давления. При этом размеры соплового блока равны примерно 10 × 180 см. При большей мощности и бóльших размерах СБ, казалось бы, появляется возможность повысить коэффициент увеличения резонатора, однако это не обязательно приведет к улучшению параметров лазерной системы, поскольку

Табл.2. Параметры резонатора ХКИЛ с апертурой 6 см.

Мощность (кВт)	Число проходов излучения в резонаторе		
	I	II	III
10	5.5	11	22.1
12	4.6	9.2	18.4
14	3.9	7.9	15.8
17	3.2	6.5	13
20	2.7	5.5	11
24	2.3	4.6	9.2
29	1.9	3.8	7.6
35	1.6	3.2	6.3
42	1.3	2.6	5.3
50	1.1	2.2	4.4
60	0.9	1.8	3.7
72	0.8	1.5	3.1

Примечание. В случае ХКИЛ низкого давления для числа проходов излучения в резонаторе (колонка I) удельный энергосъем равен 50 Вт/см<sup>2</sup>, коэффициент усиления – 0.5 м<sup>-1</sup>, длина усиления составляет 183 см; для ХКИЛ низкого давления – 200 Вт/см<sup>2</sup>, 1 м<sup>-1</sup> и 92 см (колонка II). Теоретический предел (число проходов в колонке III) равен 400 Вт/см<sup>2</sup>, 1 м<sup>-1</sup> и 92 см.

Табл.3. Параметры резонатора с апертурой 10 см.

Мощность (кВт)	Число проходов излучения в резонаторе		
	I	II	III
60	1.5	3.1	6.1
72	1.3	2.6	5.1
86	1.1	2.1	4.3
103	0.9	1.8	3.6
124	0.7	1.5	3.0
149	0.6	1.2	2.5
179	0.5	1.0	2.1
215	0.4	0.9	1.7
258	0.4	0.7	1.4
310	0.3	0.6	1.2
372	0.2	0.5	1.0
446	0.2	0.4	0.8
535	0.2	0.3	0.7

Примечание. То же, что и в случае табл.2.

мода резонатора будет плохо согласовываться с прямоугольной формой активного объема. При меньшей мощности требуется увеличить число проходов. Однако это невозможно, поскольку длина зоны положительного усиления вниз по потоку ограничена по причинам, обусловленным кинетикой процессов в АС.

В диапазоне мощностей 150–220 кВт однопроходный резонатор нормально работает в ХКИЛ высокого давления с размерами СБ примерно 10 × 90 см. Увеличение удельного энергосъема позволяет поднять мощность лазерной системы без увеличения габаритов соплового блока. Так, СБ с размерами ~10 × 90 см, имеющий энергосъем, равный теоретическому пределу, позволяет построить однопроходный резонатор для достижения мощности в диапазоне 310–450 кВт.

Результаты более детального анализа применимости различных схем резонаторов обобщены на рис.1. В координатах апертура–мощность показаны зоны применимости одно-, трех- и пятипроходных схем.

Для ХКИЛ низкого давления (рис. 1,а) в рассматриваемом классе мощности существуют два варианта резонаторов:

1. Трехпроходный резонатор типа показанного на рис.2,а. Он соответствует небольшому полю диаграммы в левом нижнем углу рис.1,а, отмеченному цифрой 3. Этот резонатор имеет размер апертуры ~3 см, длину резонаторной полости вдоль потока ~9 см, длину усиления ~180 см (при «двухэтажной» компоновке (рис.2,б) это соответствует размерам СБ примерно 6 × 30 см) и номинальную мощность 10 кВт.

2. Однопроходный резонатор с апертурой от 5 до 10 см, равной длине резонаторной полости вдоль потока. Имеет длину усиления ~180 см, высоту СБ от 5 до 10 см и номинальную мощность от 40–50 до 100 кВт. Эта схема соответствует области 2 на диаграмме рис. 1,а. При этом 50-киловаттный лазер естественно сконструировать по «двухэтажной» схеме, тогда размеры СБ составят ~10 × 90 см. Лазер мощностью 100 кВт имеет СБ с размерами 10 × 180 см.

Следует иметь в виду, что для реализации многопроходной схемы резонатора, обеспечивающей заданные значения мощности генерации при заданном размере апертуры, длина АС вдоль потока также определена однозначно. В то же время из-за релаксации усиления эта длина ограничена. Поэтому для любой схемы резонато-

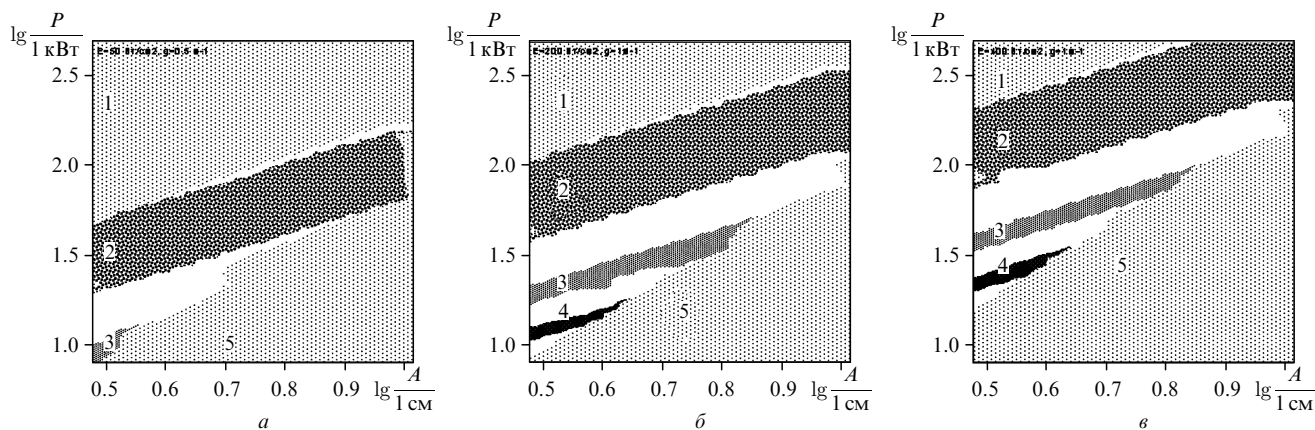


Рис.1. Зоны применимости различных схем неустойчивых резонаторов для ХКИЛ низкого (*a*) и высокого (*б*) давления; *v* – перспективный ХКИЛ с удельным энергосъемом, близким к теоретическому пределу (*A* – высота апертуры, *P* – мощность лазера). Цифрой 1 на диаграмме показаны зоны, для которых длина АС вдоль потока больше 10 см (для ХКИЛ низкого давления) или 20 см (для ХКИЛ высокого давления), цифрой 2 – зоны применимости однопроходной схемы, цифрой 3 – трехпроходной, цифрой 4 – пятипроходной; цифрой 5 показаны зоны, в которых необходимая длина АС вдоль потока меньше 3 см.

ра существует определенный диапазон размеров апертуры, в котором эта схема может быть реализована. Наивысшие параметры для каждой из схем реализуются тогда, когда длина АС вдоль потока максимальна, т. к. в этом случае задействован ее максимальный объем. Для каждого типа лазеров существуют свои кинетические ограничения на длину АС, определяемые составом среды и газодинамическими параметрами.

С учетом сказанного для ХКИЛ высокого давления (рис.1,*б*) возможны три варианта схем:

1. Пятипроходный резонатор с апертурой 3–4 см, номинальной мощностью 12–13 кВт, размерами СБ (3–4) × 90 см или (6–8) × 45 см и длиной резонаторной полости вдоль потока 15–20 см. Эта схема соответствует пересечению зоны 4 (зоны пятипроходных схем) и нижней зоны 1, соответствующей длине вдоль потока более 20 см.

2. Трехпроходный резонатор с апертурой ~6 см, размерами СБ примерно 6 × 90 см или, для «двухэтажной» компоновки, ~12 × 45 см, длиной резонаторной полости вдоль потока ~18 см и номинальной мощностью ~30–32 кВт. Эта схема находится на пересечении зон 3 и 1.

3. Однопроходный резонатор с апертурой более 10 см, размерами СБ свыше 10 × 90 см и номинальной мощностью более 150 кВт.

#### 4. Перспективный резонатор для ХКИЛ

Вышеприведенный анализ показал, что структура неустойчивого резонатора (НР) ХКИЛ должна быть строго согласована с АС. При этом, как уже говорилось, распределение коэффициента усиления имеет выраженную неоднородность вдоль потока с одним максимумом.

Можно предложить НР, который позволит учесть указанные особенности активной среды ХКИЛ и повысить эффективность лазера в целом [8]. Это резонатор, состоящий из двух оконечных сферических софокусных зеркал (резонатор конфокальный) и плоских промежуточных зеркал, число которых равно  $2(m+n)$  (где  $m=n=1, 2, 3, \dots$ ). Плоские зеркала образуют  $2m+n-1$  двухзеркальных уголкового отражателей (два плоских зеркала под углом  $90^\circ$ ), при этом ребра  $2m$  уголкового отражателей перпендикулярны направлению потока АС, а ребра  $n-1$

уголкового отражателей параллельны ему. Излучение в этом резонаторе проходит по АС  $(2m+1)n$  раз (от одного оконечного сферического зеркала до другого). Число  $n$  равно отношению размера АС в направлении, перпендикулярном потоку, к размеру апертуры лазерного пучка в том же направлении, число  $(2m+1)$  – отношению размера активной среды в направлении, параллельном потоку к размеру апертуры лазерного пучка в том же направлении; при этом размер АС в перпендикулярном потоку направлению равен высоте соплового блока лазера, а ее размер в направлении, параллельном потоку, равен расстоянию от среза соплового блока до точки, в которой коэффициент усиления слабого сигнала равен нулю.

Из вышеприведенного анализа понятно, что для ХКИЛ наиболее приемлемым значением является  $m=1$  (три прохода вдоль потока), хотя принципиально возможны и другие значения  $m$ .

Принципиальные схемы предлагаемого резонатора для  $m=1$  и различных  $n$  представлены на рис.2

Предлагаемый резонатор для сверхзвукового ХКИЛ имеет целый ряд преимуществ по сравнению с известными резонаторами:

1. Высокий коэффициент увеличения за счет многопроходности (не менее трех проходов по АС).

2. Возможность выравнивания интенсивности на выходном зеркале вследствие использования в составе резонатора переворачивающих электромагнитное поле уголкового отражателей, число и положение которых согласованы с распределением коэффициента усиления в резонаторе.

3. Высокая энергетическая эффективность, т. к. мода резонатора оптимально согласована с распределением усиления в АС: излучение за счет переворотов на уголкового отражателях последовательно проходит зоны с высоким и низким коэффициентами усиления, обеспечивая тем самым хороший энергосъем.

4. Меньшая чувствительность к разъюстировке и вибрациям, что обусловлено присутствием уголкового отражателя.

5. Параллельность направлений всех проходов по АС, что позволяет использовать в составе данного резонатора поляризационные элементы, в частности окна Брюстера (для отделения АС).

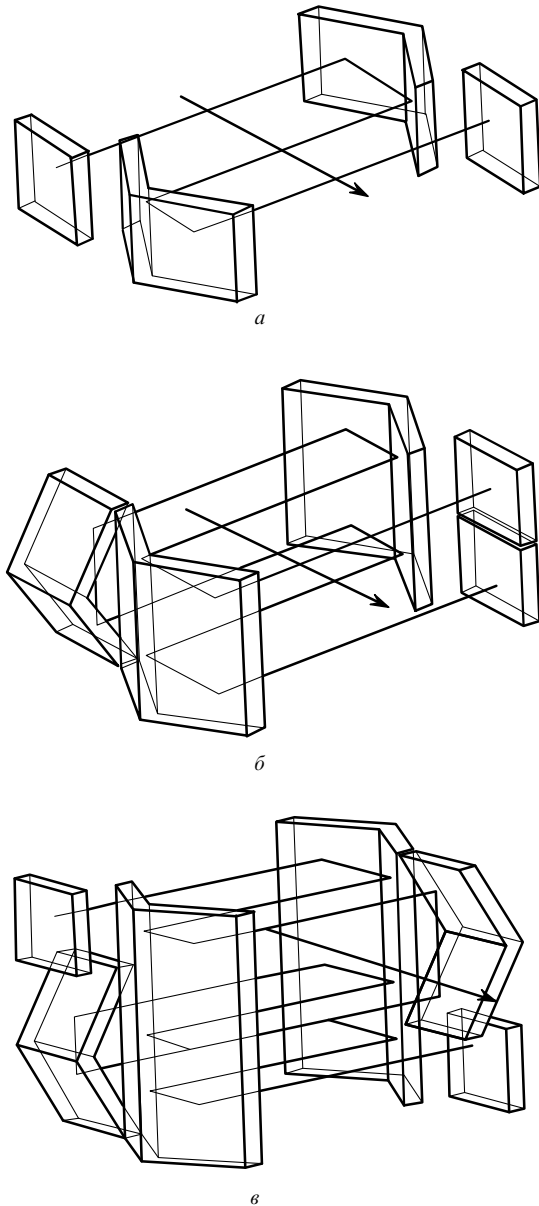


Рис. 2. Принципиальные схемы предлагаемого резонатора при  $m = 1$  (а),  $n = 2$  (б) и  $n = 3$  (в). Стрелкой показано направление потока АС от соплового блока.

Разработка схемы этого резонатора осуществлялась с использованием математического моделирования НР совместно с активной средой ХКИЛ. Математические модели были реализованы в специальном программном комплексе.

Осуществлялось численное моделирование трехмерного НР в дифракционном приближении спектральным методом с использованием алгоритмов быстрого преобразования Фурье [9]. Для этого трехмерная расчетная область НР разбивалась на отдельные сегменты, ограниченные вдоль направления распространения излучения амплитудно-фазовыми экранами. Все расчеты проводились для квадратной сетки размером  $512 \times 512$  узлов, причем центральная область сетки размером  $256 \times 256$  узлов вписывалась в апертуру АС, а оставшиеся узлы (по 128 с каждой стороны) представляли собой «охранную зону» [9]. Активная среда разбивалась на пять одинаковых сегментов. Пустые области между каждым из зеркал

и соответствующей границей АС представляли собой еще два сегмента. Указанная конфигурация расчетной области обеспечивала для рассматриваемых схем НР достаточную точность вычислений. Сферические зеркала заменялись квадратичными фазовыми экранами, сосредоточенными в конце соответствующих сегментов.

Распространение света между экранами осуществлялось в свободном пространстве, для его описания использовалось параболическое волновое уравнение вида

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - 2ik \frac{\partial u}{\partial z} = 0,$$

где  $k$  – волновое число;  $u$  – комплексная амплитуда поля.

Решение указанного уравнения проводилось спектральным методом с использованием алгоритмов быстрого преобразования Фурье.

Для каждого  $i$ -го экрана комплексная амплитуда поля световой волны домножалась на амплитудно-фазовый множитель  $A_i$ , характеризующий интегральные усиленные и абберационные свойства АС внутри сегмента:

$$u_i(x, y, z) = u(x, y, z)A_i(x, y),$$

$$A_i(x, y) = \exp[i\varphi(x, y)] \exp[g(x, y)L_i/2],$$

где  $\varphi(x, y)$  – изменение фазы поля излучения при прохождении АС в сегменте, предшествующем  $i$ -му экрану (в нашем случае АС принималась оптически однородной и, следовательно,  $\varphi(x, y) = 0$ );  $g(x, y)$  – коэффициент усиления АС;  $L_i$  – протяженность сегмента, предшествующего  $i$ -му экрану, в направлении распространения излучения.

В ходе расчетов комплексная световая волна распространялась по резонатору в прямом и обратном направлениях до получения квазиустановившегося уровня дифракционных потерь. Подробнее указанная методика описана в [9].

Для определения коэффициента усиления  $g(x, y)$  активной среды ХКИЛ использовалась специально разработанная математическая модель, основанная на двухслойной газодинамической модели смешения струй, содержащих буферный газ с синглетным кислородом и буферный газ с иодом, на основных уравнениях химической кинетики ХКИЛ и на уравнениях стационарной генерации. Данная модель расчета коэффициента усиления подробно описана в [10].

Расчеты показали, что распределение интенсивности в апертуре лазера для предлагаемого резонатора существенно более равномерное по сравнению с другими схемами. В частности, на рис. 3 представлены расчетные распределения интенсивности лазерного излучения в плоскости выходного зеркала резонатора и распределения коэффициента усиления АС в плоскости, параллельной выходному зеркалу и проходящей через середину АС, для трех схем резонаторов (рис. 4) при условии, что высота лопатки соплового блока равна 30 мм (рис. 4, а) или 60 мм (рис. 4, б и в), а  $L_{AM} = 370$  мм. Коэффициент увеличения для всех трех схем полагался равным 1.3. Расстояние между плоскостями установки зеркал  $L_m = 1$  м. На рис. 3 направление  $y$  перпендикулярно потоку, направление  $x$  – параллельно ему. Для резонатора, выполненного по схеме рис. 4, а, поперечный размер зеркал равен  $30 \times 60$  мм, по схеме рис. 4, б –  $60 \times 60$  мм, по схеме рис. 4, в –  $60 \times 30$  мм. Из диаграмм видно, что резонатор, выполненный по

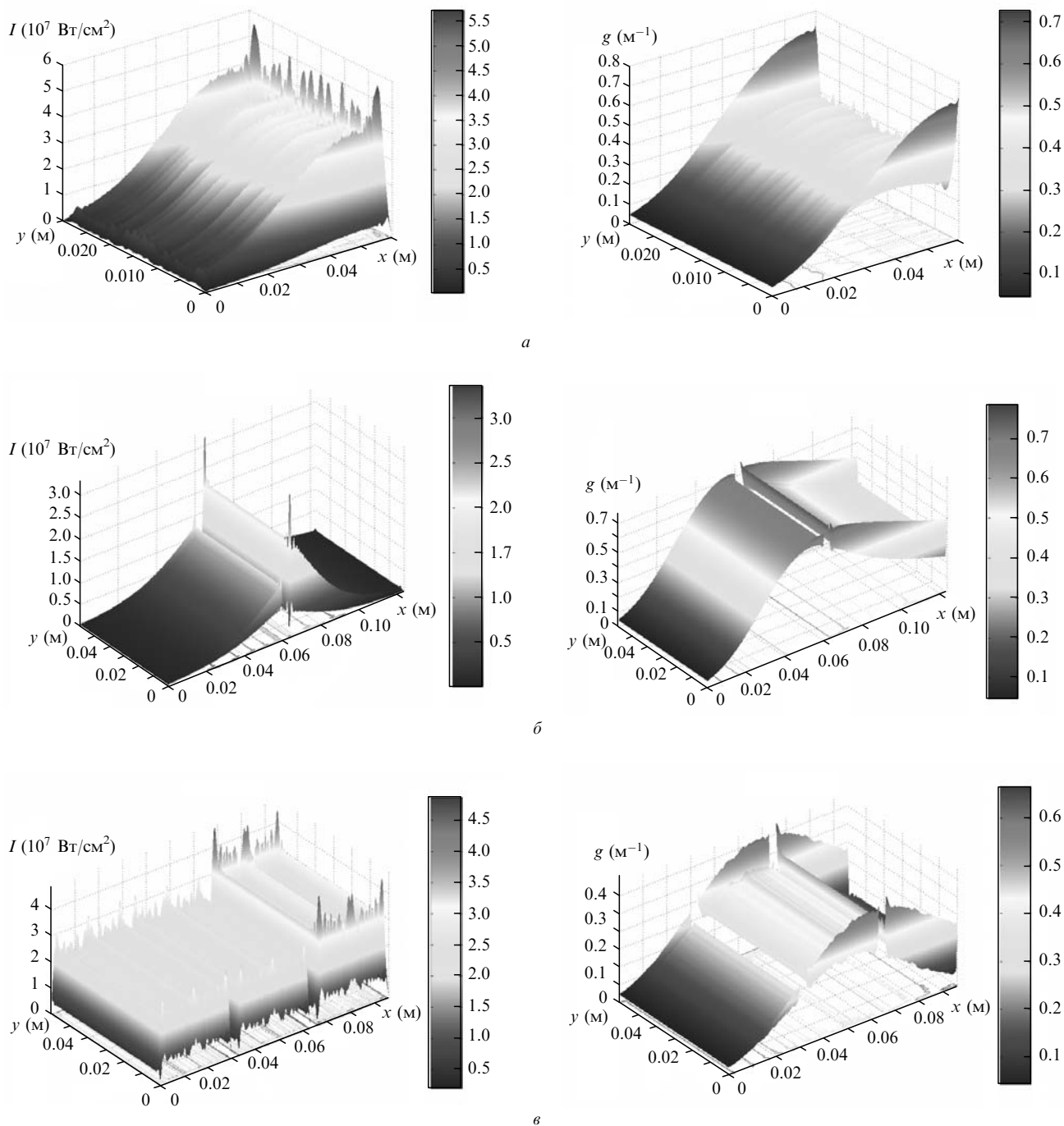


Рис.3. Распределения интенсивности излучения в плоскости выходного зеркала и коэффициента усиления АС для схем резонаторов, представленных на рис.4.а,б,в соответственно.

схеме рис.4,в, имеет более равномерное распределение интенсивности на отдельных зеркалах, а значит, и в выходном пучке, чем резонаторы, схемы которых представлены на рис.4,а и б. Кроме того, как показывают расчеты, такой резонатор при прочих равных условиях обеспечивает более высокую мощность излучения.

## 5. Заключение

Сформулируем основные выводы работы.

1. Для ХКИЛ низкого давления оптимальной представляется схема резонатора с нечетным числом проходов вдоль потока АС и «переворотом поля» посредством угловых отражателей после каждого прохода. Такая

компоновка обеспечивает высокую энергетическую эффективность резонатора и равномерное поле в апертуре. При этом число проходов поперек потока АС («этажей» резонатора) принципиальной роли не играет. Так, сопловой блок низкого давления с размерами  $6 \times 30$  см, создающий АС с длиной вдоль потока 9 см, позволяет построить резонатор с числом проходов вдоль потока 3 и поперек потока – 2. Такой резонатор при увеличении  $\sim 1.7$  дает возможность достичь мощности  $\sim 10$  кВт.

2. Для уровня мощности 30–40 кВт интерес представляет СБ высокого давления в сочетании с трехпроходной схемой резонатора. Так, для апертуры 6 см, размеров СБ  $6 \times 30$  см и длины АС вдоль потока 18 см хорошо подходит трехпроходный резонатор с увеличением 1.7–2.

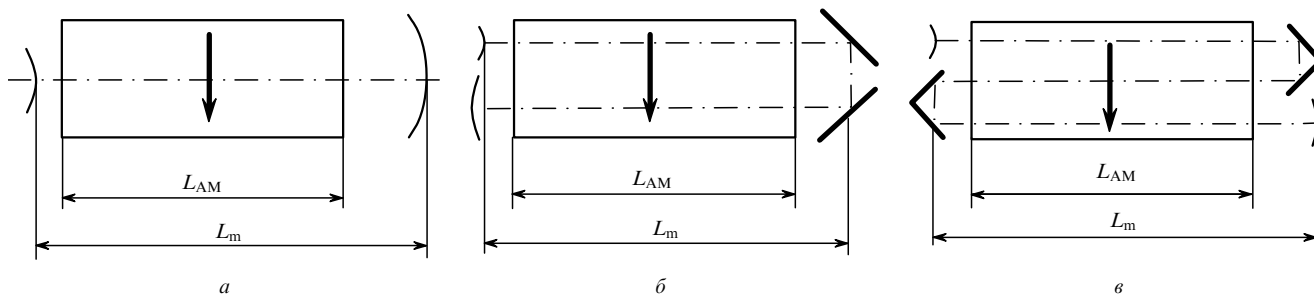


Рис.4. Альтернативные схемы резонаторов ХКИЛ – однопроходного (а), П-образного (б) и предлагаемого нового при  $m = 1, n = 1$  (в). Жирной стрелкой показано направление потока АС.

3. Для размеров апертуры более 6 см возможны только однопроходные схемы резонаторов, поскольку длина резонатора вдоль потока ограничена кинетическими процессами, протекающими в АС.

1. Ананьев Ю.А. *Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения* (М: Наука, 1979).
2. Yang Bailing. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3574**, 281 (1998).
3. Endo, Fumio Wani, Syoji Nagatomo, et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3574**, 253 (1998).
4. Борейшо А.С., Баркан А.Б., Васильев Д.Н., Евдокимов И.М., Савин А.В. *Квантовая электроника*, **35**, 495 (2005).
5. Handke J., Duschek F., Grunewald K.M., Hall T., Schall W.O. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5777**, 127 (2004).
6. Hall T., Duschek F., Grunewald K.M., Handke J., Schall W.O. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5777**, 131 (2004).
7. Загидуллин М.В., Николаев В.Д., Свистун М.И., Хватов Н.А., Андерсон Б.Т., Тейт Р.Ф., Хагер Г.Д. *Квантовая электроника*, **31**, 678 (2001).
8. Борейшо А.С., Морозов А.В., Савин А.В., Страхов С.Ю., Евдокимов И.М., Дружинин С.Л., Васильев Д.Н. Патент РФ № 2258992. Приоритет от 29.03.04.
9. Sigman A.E., Sziklas E.A. *Appl. Opt.*, **14**, 1874 (1975).
10. Savin A.V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5447**, 39 (2004).
11. Борейшо А.С., Мальков В.М., Савин А.В., Васильев Д.Н., Евдокимов И.М., Трилис А.В., Страхов С.Ю. *Квантовая электроника*, **33** (4), 307 (2003).