

## ЭФФЕКТИВНАЯ ФАЗОВАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ НАБОРА ОКГ

*В.В.Антюхов, А.Ф.Глова, О.Р.Качурин, Ф.В.Лебедев,  
В.В.Лиханский, А.П.Напартович, В.Д.Письменный*

Теоретически указана и экспериментально обнаружена возможность эффективной фазовой синхронизации двумерного набора лазеров путем использования явления воспроизведения волнового фронта периодической структуры когерентных излучателей.

В последнее время значительный интерес представляют исследования лазерных систем с большим набором оптических генераторов <sup>1-3</sup>. При отсутствии связи между отдельными генераторами излучение в каждом из них имеет независимую поляризацию, частоту и модовую структуру. Излучение от набора несвязанных генераторов обладает большой угловой расходимостью, определяемой апертурой одного элемента. Синхронизация генераторов позволяет значительно уменьшить угловую расходимость и расширяет возможные области применения многолучевых лазеров <sup>3</sup>.

Целью настоящей работы является экспериментальное и теоретическое определение условий эффективной синхронизации двумерного набора волноводных CO<sub>2</sub>-лазеров с внешним зеркалом связи за счет изменения расстояния между зеркалом и апертурой лазера.

Рассмотрим преобразование полей в наборе волноводных лазеров после полного прохода резонатора. Если на апертуре набора из  $N$  генераторов распределение поля имеет вид

$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \sum E_n \mathbf{e}_n f(\mathbf{r} - \mathbf{r}_n)$ , то после полного прохода резонатора амплитуды полей преобразуются

$$E_n(t + \tau_p) = R \hat{A}_n E(t) \exp(gl) \exp(i\varphi_n), \quad (1)$$

Здесь  $f(\mathbf{r} - \mathbf{r}_n)$  – нормированная функция волноводной моды,  $f(\mathbf{r} - \mathbf{r}_n) f(\mathbf{r} - \mathbf{r}_m) = \delta_{nm}$ ,  $\mathbf{e}_n$  – вектор поляризации данной моды,  $\mathbf{r}_n$  – положение центра апертуры  $n$ -го волновода,  $R$  – амплитудный коэффициент отражения выходного зеркала,  $g, l$  – коэффициент усиления и длина волновода,  $\varphi_n$  – изменение фазы поля за проход волновода. Оператор связи  $\hat{A}$  описывает преобразование поля излучения при проходе пустого промежутка:

$$\hat{A}_n \mathbf{E} = \iint f(\mathbf{r} - \mathbf{r}_n) \mathbf{e}_n d\mathbf{r} \frac{ik}{2\pi L} \int \mathbf{E}(x_1, y_1) \exp[ikL(x, y, x_1, y_1)] dx_1 dy_1. \quad (2)$$

При  $L=0$   $\hat{A}_n \mathbf{E} = E_n$  генерация каждого лазера происходит независимо, поскольку связь отсутствует. При малых расстояниях до зеркала  $L \ll d^2 \lambda$  ( $d$  – период сборки волноводов,  $\lambda = 2\pi/k$  – длина волны излучения) дифракционная связь осуществляется между ближайшими соседями. Собственные частоты отдельных лазеров различаются и существует пороговое значение коэффициента связи, при котором синхронизируется набор лазеров. Определение порогового коэффициента связи, при котором сфазированными оказываются лазеры, расположенные достаточно далеко, аналогично задаче Андерсона<sup>4, 5</sup> о состояниях возбуждения в поле периодически расположенных потенциальных ям со случайным разбросом энергетических уровней. Условие синхронизации лазеров совпадает с критерием перехода Андерсона в двумерной решетке<sup>4, 5</sup>:  $(\langle \Delta\varphi^2 \rangle)^{1/2} < \beta |A_{n, n+1}|$ , где  $A_{n, n+1}$  – недиагональный элемент оператора связи,  $\beta$  – коэффициент порядка единицы,  $(\langle \Delta\varphi^2 \rangle)^{1/2}$  – средний разброс фазовых набегов в волноводах. При  $L \ll d^2 \lambda$  увеличение расстояния приводит к возрастанию коэффициента связи между отдельными волноводами, но одновременно растут потери. Это обусловлено тем, что увеличивается доля излучения, попадающего в область между волноводами. Для того, чтобы проходила генерация, необходимо выполнение условия  $R \exp(g_0 l)_{max} |a_n| > 1$ , где  $a_n$  – собственные значения оператора  $\hat{A} \exp(i\varphi_n)$ ,  $g_0$  – ненасыщенный коэффициент усиления. Собственные значения оператора связи для периодически расположенных излучателей немонотонно зависят от расстояния  $L$ . Сначала с ростом  $L$  собственные значения убывают, а затем происходит их нарастание. При  $L$ , соответствующем воспроизведению исходной периодической структуры, модули собственных значений (в пренебрежении краевыми эффектами) равны единице. Этот факт связан с известным эффектом воспроизведения периодической структуры поля<sup>6, 7</sup>. Потери на согласование полей в этом случае отсутствуют. Дело в том, что если все периодически расположенные излучатели сфазированы, то после прохода излучения к зеркалу связи и обратно структура поля на апертуре совпадает с исходной при расстоянии, соответствующем длине воспроизведения. При этом возникают наиболее оптимальные условия для многолучевых систем, а именно, высокий коэффициент связи лазеров при отсутствии потерь на согласование полей.

В эксперименте использовался многолучевой волноводный  $\text{CO}_2$ -лазер<sup>3</sup>, состоящий из 61 стеклянной трубки, расположенных в сотовом порядке с периодом  $d = 0,85$  см. Лазер работал в квазистационарном режиме с длительностью импульса генерации  $\sim 0,1$  с. Энергия и мощность выходного излучения измерялись с помощью калориметра ИМО-2Н и фотоспротивления  $\text{Ge} : \text{Au}$ . Пространственное распределение выходного излучения в фокальной плоскости линзы наблюдалось на ИК-визуализаторе. Длина волны излучения определялась с помощью анализатора спектра.

На рис. 1 показана зависимость выходной мощности излучения  $P$  многолучевого лазера от расстояния  $L$  между апертурой набора трубок и зеркалом связи при постоянном уровне

накачки активной среды. При увеличении  $L$  до 3,5 м происходило монотонное уменьшение выходной мощности, связанное с ростом внутррезонаторных потерь. При дальнейшем увеличении расстояния  $L$  на зависимости мощности генерации наблюдался пик, связанный с эффектом воспроизведения периодических волновых полей. Меньшая величина пика при  $L = 5,5$  м на рис. 1, возможно, объясняется тем, что пять трубок из набора были закрыты экраном в связи с выходом их из строя. Распределения интенсивности выходного излучения в фокальной плоскости линзы при разных  $L$  показаны на рис. 2. Наименьшая расходимость

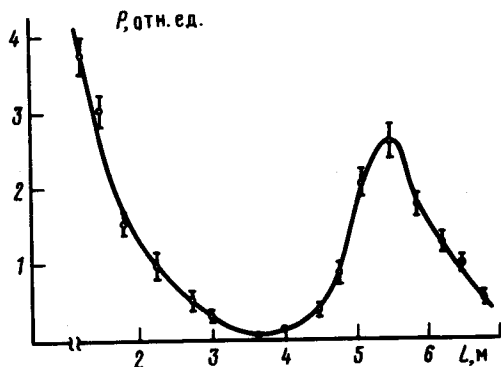


Рис. 1. Зависимость выходной мощности излучения  $P$  от  $L$



Рис. 2, а

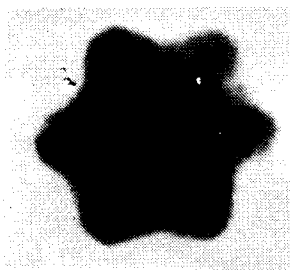


Рис. 2, б

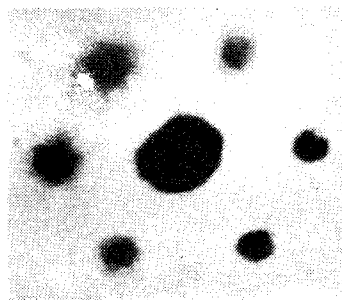


Рис. 2, в

Рис. 2. Фотографии фокального пятна излучения многолучевого  $\text{CO}_2$ -лазера: а —  $L < 1$  м, б —  $1 \text{ м} < L < 3$  м, в —  $4 \text{ м} < L < 7$  м

излучения достигается при расположении зеркала связи на расстоянии воспроизведения периодической структуры, что свидетельствует о наиболее эффективной фазовой синхронизации набора лазеров. При  $4 \text{ м} < L < 6 \text{ м}$  генерация происходила на переходах  $P$ - и  $R$ -ветвей 10-мкм области  $\text{CO}_2$ , а при  $L > 6 \text{ м}$  на переходах  $P$ - и  $R$ -ветвей 9-мкм области. При хорошей юстировке зеркала связи ( $L = 4,5 \div 7,0 \text{ м}$ ) генерация происходила на одном вращательном переходе  $\text{CO}_2$  и яркость пятен фокусировки была значительно выше, чем при  $L < 3,5 \text{ м}$ , что свидетельствует о полной синхронизации набора ОКГ.

#### Литература

1. Козлов Г.И., Кузнецов В.А., Масюков В.А. Письма в ЖЭТФ, 1978, 4, 129.
2. Антохов В.В., Бондаренко А.И., Глова А.Ф. и др. Квантовая электроника, 1981, 8, 2234.
3. Глова А.Ф., Дрейзин Ю.А., Качурин О.Р. и др. Письма в ЖТФ, 1985, 11, 249.
4. Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. Электронные свойства легированных полупроводников. М.: Наука, 1979.
5. Лифшиц И.М. УФН, 1964, 83, 617.
6. Talbot H.F. Phil. Mag. 1936, 9, 401.
7. Lord Rayleigh. Phil. Mag., 1981, 11, 196.

Поступила в редакцию  
1 июня 1986 г.