

Экспериментальное исследование пространственной структуры профиля пучка лазера с интерферометром Саньяка

В.В.Грабовский, В.И.Прохоренко, Д.Я.Яцкив

Экспериментально исследована пространственная структура профиля выходного пучка лазера на ИАГ: Nd^{3+} с резонатором на основе интерферометра Саньяка. Показано, что в широком диапазоне частот следования импульсов профиль выходного пучка описывается гауссовой кривой с достоверной вероятностью не менее 99 %, что соответствует излучению на моде TEM_{00} для устойчивого резонатора. При этом диаметр пятна излучения обратно пропорционален смещению термооптической линзы от центра интерферометра Саньяка.

Введение

В настоящее время весьма интенсивно и широко исследуются свойства лазеров, резонаторы которых построены с использованием интерферометра Саньяка (ИС), или, как принято в зарубежной научной периодике, с антирезонансным кольцом (antiresonant ring, [1]). Интерес к резонаторам такого типа вызван замечательным свойством устойчивой генерации излучения на нижней поперечной моде без дополнительной пространственной селекции известными методами, что отмечалось нами в работах [2, 3]. Как нам представляется, указанное свойство связано с эффективной селекцией пространственного спектра за счет возникновения угловой селективности интерферометра при асимметричном внесении в его кольцо активного (либо пассивного) элемента с динамической линзой [4, 5].

Кроме того, в модифицированном таким образом ИС эффективно подавляются пространственные шумы, возникающие, например, на неоднородностях активного элемента или вследствие вынужденных нелинейных процессов [6, 7].

Таким образом, на сегодня можно полагать, что резонаторы на основе ИС представляют собой отдельный самостоятельный класс резонаторов и наряду с традиционными неустойчивыми и устойчивыми резонаторами с пространственными фильтрами позволяют генерировать излучение на нижней поперечной моде, т. е. с максимальной пространственной яркостью.

Однако в отличие от резонаторов последних двух классов, достаточно хорошо исследованных как теоретически, так и экспериментально, резонаторы с ИС практически не исследовались. Нам известна только одна работа, посвященная теоретическому рассмотрению структуры поля излучения лазера с таким типом резонатора [8]. В настоящей работе экспериментально исследуется пространственный профиль выходного пучка излучения импульсного лазера с ИС и его взаимосвязь с параметрами резонатора.

1. Эксперимент

Схема эксперимента приведена на рис.1. Активный элемент ИАГ: Nd^{3+} размером $\varnothing 6.3 \times 65$ мм помещался в квантрон К104 с импульсной лампой накачки ИНП-5/60А. Лампа питалась от блока БПЛ-66/33, охлаждение квантрона осуществлялось стандартным устройством охлаждения с внешним контуром УО-1. Исследуемый лазер работал в режиме свободной генерации в импульсно-периодическом режиме. Изменение частоты следования импульсов и энергии накопителя позволяло изменять оптическую силу тепловой линзы, наводимой в активном элементе. Резонатор лазера образован выходным зеркалом 5 и интерферометром, собранным на зеркалах 2–4 (рис.1). Рабочие поверхности всех элементов резонатора были плоскими, база резонатора составляла 803 мм.

Активный элемент располагался несимметрично относительно оптического центра ИС – на расстояниях $d = 350$ и 580 мм от него (проводились два эксперимента). Профиль поперечного распределения пятна излучения исследовался в ближней зоне, для чего непосредственно за выходным зеркалом помещалась сканируемая диафрагма с диаметром отверстия 0.5 мм.

В качестве приемника излучения использовался калориметрический измеритель ИМО-3, который регистрировал среднюю мощность излучения, прошедшего через отверстие диафрагмы. Измеренные для разных режимов накачки распределения интенсивности обрабатывались программой «Peakfit».

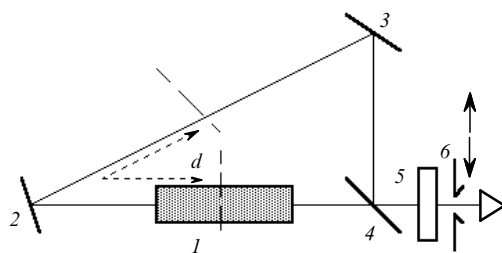


Рис.1. Оптическая схема эксперимента:

1 – активный элемент; 2, 3 – зеркала с $R = 100\%$; 4 – зеркало с $R = 50\%$; 5 – выходное зеркало; 6 – сканируемая диафрагма; 7 – измеритель мощности ИМО-3.

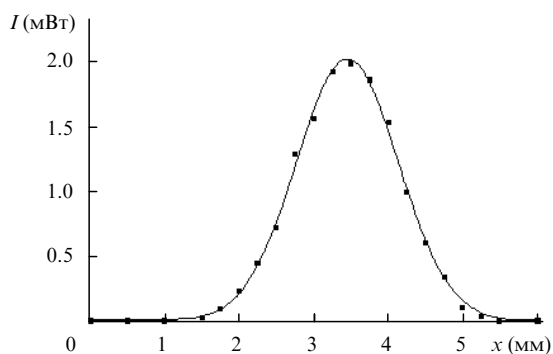


Рис.2. Поперечный профиль пятна выходного излучения лазера с резонатором на основе ИС на частоте $f = 15$ Гц (точки – эксперимент, сплошная линия – результат обработки).

Обработка показала, что все измеренные профили пучка описываются гауссовой кривой с доверительной вероятностью не менее 99 %. В качестве примера на рис.2 показан один из измеренных профилей (точки – эксперимент, сплошная линия – гауссова кривая).

Фокусное расстояние тепловой линзы, наводимой в активном элементе за счет поглощения излучения лампы накачки, измерялось методом Фабри – Юдина [9] при тех же условиях охлаждения, что и измерения профиля пятна генерации. На рис.3 показана зависимость оптической силы тепловой линзы от электрической мощности подводимой накачки. Она хорошо описывается уравнением, соответствующим теоретическому уравнению [10]:

$$D = 0.375(P + P_1), \quad (1)$$

где D – оптическая сила в диоптриях; P – мощность накачки разрядного контура в киловаттах; P_1 – мощность дежурной дуги в киловаттах. Как видно из рис.3, $P_1 = 0.2$ кВт. Следует отметить, что тепловая линза в условиях импульсно-периодической накачки активного элемента при интенсивном охлаждении является квазистационарной. Мы измеряем фокусное расстояние линзы, установившейся в активном элементе в конце импульса накачки. Изменения фокусного расстояния за время импульса значительны для малых частот следования при небольших энергиях накачки. Следовательно, поскольку измерения профиля пучка проводятся для режима свободной генерации (длительность импульса генерации составляет примерно 100 мкс), то в этом случае мы измеряем изменяющийся по длительности импульса профиль, т. е.

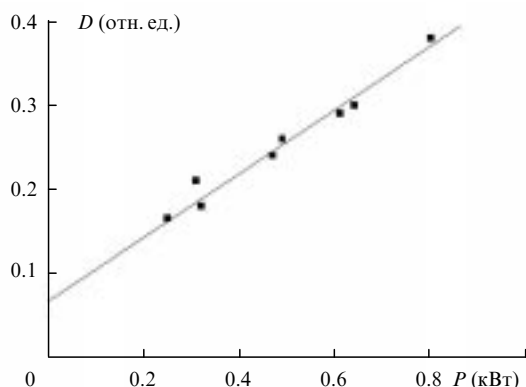


Рис.3. Зависимость оптической силы тепловой линзы D от электрической мощности, подводимой к лампе накачки.

суперпозицию мгновенных профилей. Для больших энергий накачки и частот повторения импульсов изменение фокусного расстояния за время импульса незначительно и линзу в активном элементе можно считать стационарной.

2. Результаты и обсуждение

На рис.4 приведены экспериментальные зависимости полуширин пятен генерации от фокусного расстояния наведенной термолинзы для двух положений активного элемента в ИС. Оптическая сила термолинзы изменялась путем изменения частоты следования f в пределах 1–50 Гц, фокусное расстояние вычислялось по найденной экспериментальной зависимости (1). Указанный на рис.4 масштаб $D_{0.5}^4 = f(x)$ выбран из тех соображений, что, как известно [11], для устойчивых резонаторов диаметр пят-на излучения моды TEM_{00} пропорционален корню четвертой степени из фокусного расстояния линзового элемента, содержащегося в нем. Как видно из рис.4, обе зависимости хорошо аппроксимируются прямой линией. Следовательно, можно полагать, что резонатор с ИС и активным элементом, размещенным несимметрично в кольце интерферометра, является устойчивым.

Основанное на эксперименте предположение противоречит выводу теоретической работы [8], где утверждается, что резонатор с ИС обладает так называемой специфической неустойчивостью. Кроме того, в той же работе сделан вывод о том, что форма пятна генерации должна представлять собой волну гауссова профиля с множителем, обратно пропорциональным четвертой степени поперечной координаты. Однако измеренное распределение интенсивности с высокой точностью описывается гауссианом. В плане полемики отметим, что полученное в [8] выражение для распределения поля излучения является ошибочным, так как не описывает поле в центре пучка (согласно выражению (8) из [8] при $r = 0$ поле обращается в бесконечность).

Отметим еще один момент, связанный с вопросом, как указывалось в [8], о принципиальной недостижимости стационарного модового состава. В более ранней нашей работе [12] описан импульсный лазер с ИС и активной модуляцией добротности. Несмотря на малое время переключения добротности (3 нс) и малую задержку появления импульса генерации относительно фронта переключения ($\delta < 10$ нс), лазер, тем не менее, генерировал излучение с гауссовым профилем пятна. Таким образом, поле в резонаторе формируется за малое число прохо-

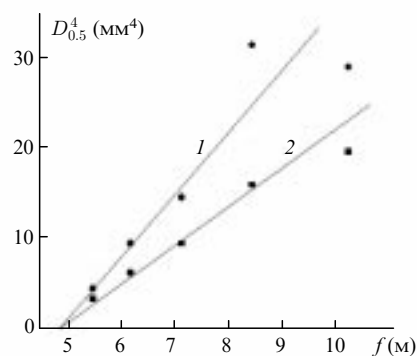


Рис.4. Экспериментальные зависимости полуширин пятен генерации $D_{0.5}$ от фокусного расстояния наведенной термолинзы f для положений активного элемента в ИС $d = 358$ (1) и 580 мм (2).

дов, следовательно, можно заключить, что такой резонатор обладает стационарным модовым составом.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования профиля пятна излучения лазера с резонатором на базе ИС позволяют сделать следующие выводы:

1. Излучение в ближней зоне имеет гауссово распределение, соответствующее моде TEM_{00} для устойчивого резонатора.

2. Зависимость диаметра пятна генерации от фокусного расстояния термолинзы, наводимой в активном элементе, имеет такой же вид, как и для классического устойчивого резонатора. Следовательно, резонатор на базе ИС с линзой, несимметрично расположенной в его кольце, является устойчивым.

3. Диаметр пятна генерации обратно пропорционален смещению линзы от оптического центра ИС.

В заключение отметим, что мы предполагаем в дальнейшем теоретически обосновать полученные экспериментальные результаты.

Работа выполнена при поддержке фирмы «Динамик Лтд» (Киев) и частично – гранта Международного научного фонда.

1. Siegman A.E. *IEEE J. Quantum Electron.*, **9**, 247 (1973).
2. Безродный В.И., Прохоренко В.И., Тихонов Е.А. и др. *Тезисы*

докл. V Всес. конф. «Оптика лазеров» (Л., 1986, с.144).

3. Прохоренко В.И., Тихонов Е.А., Яцкив Д.Я. и др. *Квантовая электроника*, **14**, 804 (1987).
4. Прохоренко В.И., Тихонов Е.А., Яцкив Д.Я. *ЖТФ*, **61**, № 4, 72 (1991).
5. Безродный В.И., Прохоренко В.И., Тихонов Е.А. и др. А.с. № 1671105ю *Бюлл. Госкомизобр.*, вып. 30 (1991).
6. Прохоренко В.И., Суровцев Д.В., Тихонов Е.А. и др. *Квантовая электроника*, **17**, 288 (1990).
7. Grabovsky V.V., Prokhorenko V.I., Yatskiv D.Ya. *Opt. Engng.*, **34**, 1016 (1995).
8. Розуван С.Г., Тихонов Е.А. *ЖПС*, **60**, 261 (1994).
9. Копылов Ю.Л. *ПТЭ*, № 1, 195 (1979).
10. Мезенов А.В., Сомс Л.Н., Степанов А.И. *Термооптика твердотельных лазеров* (Л., Машиностроение, 1979).
11. Ананьев Ю.А. *Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения* (М., Наука, 1979).
12. Bondar M.V., Grabovskiy V.V., Prokhorenko V.I. et al. *Optical Engng Bull.*, **4**, 15 (1994).

V.V.Grabovskii, V.I.Prokhorenko, D.Ya.Yatskiv. Experimental investigation of the spatial structure of the beam profile of a laser with a Sagnac interferometer.

An experimental investigation was made of the spatial structure of the output beam profile of an YAG:Nd³⁺ laser with a cavity based on a Sagnac interferometer. In a wide range of pulse repetition frequencies, the output beam profile could be described by a Gaussian curve with a confidence probability of at least 99 %. This corresponded to the emission of the TEM_{00} mode from a stable cavity. The diameter of the radiation spot was inversely proportional to the shift of a thermo-optical lens from the centre of the Sagnac interferometer.