

77-306



Научно-исследовательский институт ядерной физики

На правах рукописи

КЛОЧАН ЕЛЕНА ЛЕОНИДОВНА

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВСТРЕЧНЫХ ВОЛН В  
ТВЕРДОТЕЛЬНОМ КОЛЬЦЕВОМ ЛАЗЕРЕ

(С1.04.04 - физическая электроника, в том числе квантовая)

Автореферат

диссертации на соискание ученой  
степени кандидата физико-матема-  
тических наук

ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА · 1977

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте ядерной физики МГУ.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник  
Е.Г.ЛАРИОНЦЕВ

Официальные оппоненты: доктор технических наук  
Э.Г.ПЕСТОВ (г. Москва)  
кандидат физико-математических наук  
А.М.ХРОМЫХ (г. Москва)

Оппонирующая организация: Научно-исследовательский институт физики при ЛГУ (г. Ленинград)

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ 197 г.

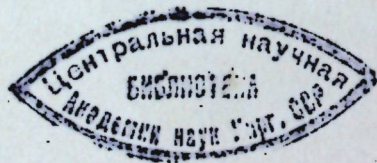
Защита состоится " \_\_\_\_\_ 1977 г.

на заседании специализированного совета № I отделения ядерной физики в Московском государственной университете им.М.В.Ломоносова (Москва, П17234, Ленинские горы, 19 корпус МГУ, ауд. 2-15).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.

Ученый секретарь  
совета

Т.И.КОЛОМЕНСКАЯ



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Интерес к исследованиям оптических квантовых генераторов с кольцевым резонатором обусловлен следующими особенностями кольцевых лазеров.

Во-первых, кольцевой резонатор обладает чувствительностью к вращению и различного рода невязанным эффектам, проявляющимся при распространении встречных волн. В связи с этим кольцевые лазеры можно использовать для измерения угловых скоростей вращения, параметров анизотропных сред, скоростей потока газа или жидкости.

Во-вторых, в кольцевых лазерах возможно получение однонаправленной генерации. В режиме однонаправленной генерации имеет место пространственно-однородное выжигание инверсной населенности, что в средах с одноордноуширенной линией люминесценции дает возможность получить одномодовую генерацию при больших мощностях излучения.

В-третьих, в твердотельных кольцевых лазерах (ТКЛ) большой интерес представляет исследование физики взаимодействия встречных волн при одноордноуширенной линии люминесценции, так как в этом случае конкуренция между встречными волнами оказывается наиболее сильной и это приводит к большому разнообразию режимов генерации ТКЛ в зависимости от параметров лазера.

До последнего времени наиболее интенсивно исследовались газовые кольцевые лазеры. К настоящему времени они нашли широкое практическое применение и детально исследованы как экспериментально, так и теоретически.

Интерес к исследованию твердотельных кольцевых лазеров возрос в последнее время в связи с получением непрерывной гене-

рации кольцевого лазера на  $\text{YAG:Na}^{3+}$ . Эксперименты показали, что непрерывнодействующий ТКЛ представляет собой сложную автоколебательную систему, в которой может возбуждаться большое число качественно отличных режимов генерации.

В теоретических работах, появившихся до начала наших исследований, не было объяснено существование ряда режимов генерации покоящегося ТКЛ (устойчивого режима стоячей волны, автомодуляционного режима). Кроме того, совершенно не исследовались режимы генерации вращающегося ТКЛ, а также влияние связи через рассеяние на спектральные характеристики ТКЛ.

Целью работы является теоретическое исследование взаимодействия встречных волн в ТКЛ с однородноуширенной линией люминесценции. В частности, рассмотрены следующие вопросы:

1. Влияние параметров кольцевого лазера на условия существования и устойчивости различных режимов генерации ТКЛ.

2. Зависимость характеристик генерации ТКЛ от скорости вращения при различных параметрах лазера.

3. Возможность мягкого выхода ТКЛ из режима синхронизации встречных волн в режим бегущей.

4. Спектральные характеристики покоящегося и вращающегося ТКЛ. Возможность одномодовой генерации при работе ТКЛ в режиме бегущей волны.

Научная новизна. Проведено исследование конкуренции встречных волн в покоящемся ТКЛ. Впервые получены условия существования и устойчивости различных режимов генерации покоящегося ТКЛ. Впервые исследованы характеристики стационарной генерации вращающегося ТКЛ при произвольных коэффициентах связи встречных волн и скоростях вращения. Впервые исследована зависимость

спектральных характеристик ТКЛ от связи встречных волн через обратное рассеяние и скорости вращения ТКЛ.

Научная и практическая ценность работы. Результаты, полученные в диссертации, позволяют глубже понять особенности конкурентного взаимодействия встречных волн в ТКЛ с однородноуширенной линией люминесценции и объяснить значительное число экспериментальных данных, полученных при исследовании ТКЛ.

Практическая ценность данной работы определяется возможностью технических применений ТКЛ в гироскопии, а также их применением в качестве источников мощного одномодового излучения. Основные выводы диссертации имеют практическое значение для выбора режимов работы ТКЛ, а также для получения оптимальных характеристик излучения.

#### СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Библиография содержит 78 наименований.

Во введении обсуждается актуальность темы диссертации, формулируется цель работы и кратко излагается основное содержание диссертации.

Первая глава диссертации содержит литературный обзор теоретических и экспериментальных исследований ТКЛ. В ней излагаются также основные результаты исследований газсвх кольцевых лазеров (ТКЛ), имеющие отношение к рассматриваемым в диссертации вопросам.

Вторая глава диссертации носит вводный характер. Она включает в себя изложение основных приближений полуклассической

теории лазеров и получение исходной системы уравнений для медленно-меняющихся комплексных амплитуд электромагнитного поля и для инверсной населенности в случае ТКЛ.

Во второй главе вычисляются также коэффициенты связи встречных волн за счет отражений от торцов активного кристалла при нормальном падении света на кристалл. Показано, что в этом случае коэффициенты связи являются комплексно сопряженными.

Кроме того, в этой главе приведен краткий обзор работ по механизмам возникновения различных типов связи. Обычно связь встречных волн обусловлена действием нескольких механизмов одновременно, при этом рассчитать коэффициенты связи практически удается лишь для немногих частных случаев. В данной диссертации, как и в большинстве работ по теории кольцевых лазеров, связь встречных волн через обратное рассеяние вводится феноменологически, с помощью комплексных коэффициентов  $\tilde{m}_{1,2} = m_{1,2} e^{2i\theta_{1,2}}$ .

В заключительном параграфе второй главы в приближении слабого поля получено характеристическое уравнение, позволяющее исследовать устойчивость стационарных режимов генерации ТКЛ. Стационарными мы называем такие режимы генерации, в которых интенсивности и разность фаз встречных волн не зависят от времени. Полученное во второй главе характеристическое уравнение справедливо как для покоящегося, так и для вращающегося ТКЛ при любых соотношениях между интенсивностями встречных волн.

В третьей главе исследуются стационарные режимы генерации покоящегося ТКЛ при мало отличающихся модулях коэффициентов связи. Показано, что связь встречных волн через обратное рассеяние существенно влияет на конкурентное взаимодействие встречных волн.

Если при отсутствии связи в покоящемся ТКЛ из-за сильной конкуренции происходит подавление одной из встречных волн и устанавливается режим бегущей волны, то под действием связи в покоящемся ТКЛ возможно возникновение ряда режимов генерации: режима стоячей волны, режима с неравными интенсивностями встречных волн и автомодуляционного режима.

Исследование условий существования и устойчивости режима стоячей волны показало, что

а) режим стоячей волны в покоящемся ТКЛ возможен только при равенстве модулей коэффициентов связи  $m_1 = m_2 = m$  (при малом отклонении модулей коэффициентов связи режим генерации близок к стоячей волне);

б) условие устойчивости стоячей волны имеет вид:

$$m \left| \sin \frac{\theta_1 - \theta_2}{2} \right| \geq \frac{\omega}{Q} \left[ 1 - \frac{\sqrt{1 + 8(1 + \eta)} - 1}{2(1 + \eta)} \right] \quad (I)$$

где  $\frac{\omega}{Q}$  - ширина полосы резонатора,  $\eta = \frac{W}{W_{\text{пор}}} - 1$  - превышение уровня накачки над пороговым значением.

Условие устойчивости стоячей волны (I) имеет простой физический смысл. При наличии двух встречных волн инверсная населенность в среде выжигается пространственно неоднородно. В силу этого встречные волны с различными интенсивностями неодинаково усиливаются за время прохода по резонатору. В отсутствие связи встречных волн через рассеяние более интенсивная волна усиливается сильнее. Это приводит к полному подавлению более слабой волны и неустойчивости стоячей волны. При наличии связи эффективные коэффициенты усиления встречных волн изменяются.

При выполнении условия (I) оказывается, что более слабая волна

усиливается сильнее. Это приводит к устойчивости режима стоячей волны.

Помимо режима стоячей волны в покоящемся ТКЛ может существовать также другой устойчивый стационарный режим: режим с неравными интенсивностями встречных волн.

Аналитически удается исследовать лишь частный случай режима с неравными интенсивностями - режим генерации, близкий к бегущей волне. Ранее режим генерации, близкий к бегущей волне, исследовался Э.М.Беленовым при комплексно сопряженных коэффициентах связи. Нам удалось обобщить результаты Э.М.Беленова на случай произвольных коэффициентов связи.

В общем случае режим с неравными интенсивностями встречных волн исследовался численно. Расчеты проводились при равных модулях коэффициентов связи ( $m_1 = m_2 = m$ ) для различных значений разности фаз коэффициентов ( $0 \leq |\vartheta_1 - \vartheta_2| \leq \pi$ ). Показано, что

а) стационарный режим генерации с неравными интенсивностями встречных волн может существовать только в том случае, когда режим стоячей волны неустойчив;

б) степень подавления более слабой волны увеличивается при уменьшении модуля коэффициентов связи;

в) режим с неравными интенсивностями встречных волн практически является режимом почти однонаправленной генерации, если разность фаз коэффициентов связи не близка к  $\pi$  ( $|\vartheta_1 - \vartheta_2| \leq 0.9\pi$ );

г) при любой фиксированной разности фаз коэффициентов связи существует интервал значений  $m$ , в котором нет устойчивого стационарного режима генерации. В этой области должен существовать нестационарный режим генерации с амплитудами, зависящими от времени (автомодуляционный режим).

Таким образом, в зависимости от величины связи в покоящемся ТКЛ могут возбуждаться различные режимы генерации. При сильной связи (см. условие (I)) возбуждается режим стоячей волны. При уменьшении связи он сменяется автомодуляционным режимом. При дальнейшем уменьшении связи автомодуляционный режим переходит в устойчивый стационарный режим с неравными интенсивностями встречных волн.

Кроме исследования стационарных режимов генерации в покоящемся ТКЛ, в третьей главе показано, что связь встречных волн через обратное рассеяние может приводить к уменьшению порогового уровня накачки. Уменьшение порога объясняется тем, что за счет связи часть энергетических потерь одной волны преобразуется в излучение другой волны, и наоборот.

В четвертой главе диссертации изучается влияние частотной невязанности встречных волн, возникающей из-за вращения, на генерацию ТКЛ. Основное внимание уделено исследованию стационарных режимов генерации, которые во вращающемся лазере называются режимами синхронизации встречных волн (частоты встречных волн равны, несмотря на частотную невязанность). Нами рассматривались условия устойчивости режимов синхронизации и возможность их перехода в режим биений под действием малых возмущений ("мягкий переход").

Характеристики режимов генерации вращающегося ТКЛ качественно различны в зависимости от того, какой из трех возможных режимов генерации имеет место в покоящемся ТКЛ - режим стоячей волны, автомодуляционный режим или режим с неравными интенсивностями.

Если в покоящемся лазере генерируется стоячая волна, то при

вращении лазера разность фаз встречных волн изменяется, их амплитуды становятся неравными.

Аналитически был исследован случай сильной связи с близкими фазами коэффициентов ( $m_{12} \gg \frac{\omega}{Q} \eta$ ;  $|\frac{\delta_1 - \delta_2}{2}| = |\delta| \ll 1$ ). Полученные условия устойчивости при равных модулях коэффициентов связи имеют вид:

$$m \left| \frac{\delta_1 - \delta_2}{2} \right| \geq \frac{\omega}{Q} \eta \frac{m \sqrt{m^2 + \Omega^2}}{3m^2 + 2\Omega^2} \quad (2)$$

где  $\Omega$  - расстройка собственных частот резонатора из-за вращения ( $\Omega$  пропорционально скорости вращения).

Из условия устойчивости (2) следует, что если в покоящемся лазере ( $\Omega = 0$ ) стационарный режим генерации устойчив, то он остается устойчивым при любых скоростях вращения.

Таким образом, в твердотельном кольцевом лазере существует режим синхронизации встречных волн, не переходящий в режим биений при увеличении скорости вращения. При этом с ростом скорости вращения происходит подавление одной из встречных волн.

Режим синхронизации встречных волн, не переходящий в режим биений при увеличении скорости вращения характерен только для твердотельного лазера, и в газовых лазерах не имеет места. Это связано с тем, что в ТКЛ время релаксации инверсной населенности много больше времени релаксации интенсивности поля (в газовых лазерах, наоборот, время релаксации поля больше времени релаксации инверсной населенности).

Из условия (2) следует, что если в покоящемся ТКЛ режим стоячей волны неустойчив (имеет место автомодуляционный режим), то начиная с некоторой скорости вращения становится устойчивым

режим синхронизации встречных волн. Расстройка собственных частот резонатора, соответствующая переходу автомодуляционного режима в режим синхронизации, равна:

$$\Omega_{cr} = \pm \frac{1}{2\sqrt{2}|\delta|} \left\{ -12m^2\delta^2 + \left(\frac{\omega}{Q}\eta\right)^2 + \frac{\omega}{Q}\eta \sqrt{\left(\frac{\omega}{Q}\eta\right)^2 - 8m^2\delta^2} \right\}^{1/2} \quad (3)$$

При произвольных коэффициентах связи режимы синхронизации встречных волн исследовались численно. Проведенные исследования показали, что отмеченные выше особенности режимов синхронизации в ТКЛ (существование неограниченной полосы синхронизации и переход от автомодуляционного режима к режиму синхронизации) имеют место при произвольных коэффициентах связи. Таким образом, показано, что "мягкое" возбуждение режима биений в твердотельном кольцевом лазере не имеет места. Исследования в нашей работе /1/ режимы синхронизации с ограниченной областью устойчивости имеют место только при антикомплексно сопряженной связи. Как показали численные исследования, при малых отклонениях связи от антикомплексно сопряженной, полоса синхронизации становится неограниченной.

Существование режимов с неограниченной полосой синхронизации и переход от автомодуляционного режима к режиму синхронизации подтверждены в экспериментах Н.В.Кравцова и А.Н.Шелаява. Помимо этих режимов генерации, Н.В.Кравцовым и А.Н.Шелаявым получены также режимы с конечной полосой синхронизации. Возможно, что в ТКЛ переход от режима синхронизации к режиму биений осуществляется "жестко", за счет сильных флуктуаций. Косвенно это предположение подтверждается тем, что граница полосы синхронизации в экспериментах нестабильна. Теоретическое

исследование вероятности жесткого возбуждения режима биеений нами не проводилось.

Если в покоемся ТКЛ возбуждается режим с неравными интенсивностями встречных волн, то при вращении меняется разность фаз встречных волн и усиливается степень подавления более слабой волны. Существуют два устойчивых режима с неравными интенсивностями, отличающиеся направлением распространения более сильной волны. Область устойчивости режимов с неравными интенсивностями несимметрична. При  $\sin(\nu_1 - \nu_2) > 0$  режим с  $I_1 > I_2$  устойчив при всех расстройках собственных частот  $\Omega < \Omega_1$  ( $\Omega_1 > 0$ ), а режим с  $I_2 > I_1$  устойчив при  $\Omega > \Omega_2$  ( $\Omega_2 < 0$ ).

В четвертой главе исследуется также зависимость порогового значения скорости накачки от скорости вращения при различных параметрах связи. Показано, что при увеличении скорости вращения пороговый уровень накачки растет, приближаясь к величине порога в отсутствие связи. Рост порогового уровня приводит к тому, что при малых превышениях над порогом при увеличении скорости вращения возможен срыв генерации.

Пятая глава диссертации посвящена исследованию спектральных характеристик ТКЛ.

Исследуется устойчивость режима стоячих волн в покоемся ТКЛ при генерации нескольких аксиальных мод. За счет генерации стоячих волн в нескольких модах пространственная неоднородность инверсной населенности уменьшается и это приводит к изменению условий устойчивости стоячей волны. Показано, что многомодовый режим стоячих волн становится устойчивым при меньшей величине связи, чем одномодовый. При отсутствии связи через рассеяние многомодовый режим стоячих волн, как и одномодовый, неустойчив,

несмотря на уменьшение пространственной неоднородности инверсной населенности.

В пятой главе исследуется также влияние связи через обратное рассеяние на устойчивость одномодовой генерации в режиме бегущей волны. Это влияние может быть существенным, поскольку при наличии связи имеет место пространственно неоднородное выжигание инверсной населенности из-за существования слабой встречной волны. Как известно, пространственная неоднородность инверсной населенности способствует многомодовой генерации.

При исследовании устойчивости одномодового режима предполагается, что инверсная населенность среды полностью определяется полем генерирующей центральной моды, которое состоит из сильной бегущей волны с комплексной амплитудой  $\tilde{E}_{+0}$  и слабой встречной волны с амплитудой  $\tilde{E}_{-0}$ .

Исследование условий возбуждения  $n$ -й аксиальной моды показало, что в покоемся лазере для практически существующих параметров связи условие возбуждения боковых мод заведомо выполняется при равных добротностях мод. Поэтому при использовании покоемся ТКЛ бегущей волны для получения одномодовой генерации необходимо вводить внутрь резонатора либо селектирующие устройства, либо невзаимный элемент, создающий разность добротностей для встречных волн.

Значительно легче осуществляется одномодовая генерация во вращающемся лазере. Показано, что при достаточно больших скоростях вращения боковые моды не возбуждаются даже при равных добротностях мод.

Результаты исследований спектральных характеристик ТКЛ хорошо согласуются с экспериментальными данными.

В заключении сформулированы основные выводы диссертации.

Основные результаты и выводы диссертации, защищаемые автором:

1. Показано, что основными параметрами твердотельного кольцевого лазера, определяющими режимы генерации, являются связь встречных волн через обратное рассеяние и расстройка собственных частот резонатора для встречных волн из-за вращения.

2. Исследовано влияние связи встречных волн через обратное рассеяние на основные режимы генерации покоящегося ТКЛ:

а) показано, что при достаточно сильной связи существует и устойчив режим стоячей волны;

б) при уменьшении связи режим стоячей волны сменяется автомодуляционным режимом генерации;

в) при дальнейшем уменьшении связи возникает устойчивая стационарная генерация с неравными интенсивностями встречных волн; режим с неравными интенсивностями с уменьшением связи переходит в режим однонаправленной генерации.

3. Исследовано влияние вращения ТКЛ на взаимодействие встречных волн:

а) показано, что в ТКЛ могут существовать устойчивые режимы синхронизации встречных волн, не переходящие в режим биений при увеличении скорости вращения. Существование таких режимов специфично для ТКЛ и в газовых лазерах не имеет места;

б) показана невозможность "мягкого" возбуждения режима биений в ТКЛ;

в) показано, что при больших скоростях вращения имеет место конкурентное подавление одной из встречных волн;

г) показана возможность перехода автомодуляционных режимов

генерации в режим синхронизации встречных волн при увеличении скорости вращения;

д) исследовано влияние связи встречных волн через обратное рассеяние и вращения кольцевого лазера на порог генерации. Показано, что при наличии связи возможен срыв генерации при увеличении скорости вращения.

4. Исследованы спектральные характеристики в режимах однонаправленной генерации покоящегося и вращающегося ТКЛ:

а) в покоящемся ТКЛ исследована устойчивость одномодового режима однонаправленной генерации. Показано, что связь через обратное рассеяние способствует возбуждению большого числа мод;

б) показано, что при больших скоростях вращения одномодовый режим однонаправленной генерации становится устойчивым, несмотря на дестабилизирующее влияние связи через рассеяние.

Личное участие автора в получении научных результатов, изложенных в диссертации.

1. Автором были получены все основные теоретические результаты, описанные в диссертации.

2. Автором были предложены методы расчета характеристик стационарных режимов генерации ТКЛ при произвольных коэффициентах связи и скоростях вращения.

3. Автор непосредственно участвовала в проведении расчетов на ЭВМ.

4. Автор принимала непосредственное участие в объяснении экспериментальных исследований ТКЛ.

5. Все научные выводы, содержащиеся в диссертации, получены автором самостоятельно.



Основные результаты работы докладывались на Всесоюзных совещаниях и конференциях по кольцевым лазерам в 1973, 1974, 1975 и 1976 годах и опубликованы в работах:

1. Е.Л.Клочан, Л.С.Корниенко, Н.В.Кравцов, Е.Г.Ларионцев, А.Н.Шелаев. Письма в ЭТФ, 17, 405 (1973).
2. Е.Л.Клочан, Л.С.Корниенко, Н.В.Кравцов, Е.Г.Ларионцев, А.Н.Шелаев. ЭТФ, 65, 1344 (1973).
3. Е.Л.Клочан, Л.С.Корниенко, Н.В.Кравцов, Е.Г.Ларионцев, А.Н.Шелаев. ДАН СССР, 215, 313 (1974).
4. Е.Л.Клочан, Л.С.Корниенко, Н.В.Кравцов, Е.Г.Ларионцев, А.Н.Шелаев. Радиотехника и электроника, 19, 2096 (1974).
5. Е.Л.Клочан, Л.С.Корниенко, Н.В.Кравцов, Е.Г.Ларионцев, А.Н.Шелаев. Письма в ЭТФ, 21, 30 (1975).

---

Подл. к печати 11/7-77г. Л-79298 Ф.  
Физ. п. л. 10 Уч.-изд. л. Заказ 1083  
Тираж 200

---

Изд-во Московского университета, Москва, К-9,  
ул. Герцена, 5/7.  
Типография Изд-ва МГУ. Москва, Ленгори