

На правах рукописи

Кривонос Михаил Сергеевич

**ГЕНЕРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ДВУХЧАСТОТНЫЙ
РЕЖИМ ПРИ СИНХРОНИЗАЦИИ ПОПЕРЕЧНЫХ МОД
В ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРАХ
С ПРОДОЛЬНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ**

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор Попов Юрий Михайлович.

Научный консультант:

кандидат физико-математических наук Горбунков Михаил Валериевич.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, заведующий лабораторией

Михайлов Виктор Алексеевич (ИОФ РАН);

кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией

Сенатский Юрий Всеволодович (ФИАН).

Ведущая организация:

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова.

Защита состоится 17 июня 2013 года в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 002.023.03 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН) по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53.

Автореферат разослан «___» _____ 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.023.03,
доктор физико-математических наук,
профессор

А.С. Шиканов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Стремительное развитие технологии производства лазерных диодов (ЛД) и улучшение их характеристик [1] позволило создать компактные твердотельные лазеры с лазерной диодной накачкой (ТЛЛДН) с высокими пространственными и генерационными характеристиками [2, 3]. Коэффициент полезного действия (КПД) современных ТЛЛДН (десятки процентов, [4-6]) почти на порядок превышает КПД традиционных лазеров с ламповой накачкой. Отличительной характеристикой ТЛЛДН является высокая частотная и временная стабильность.

Как правило, ТЛЛДН имеют малые габариты и в значительном числе случаев они не требуют водяного охлаждения. Это обеспечивает широчайшие перспективы их практического использования [3]. Тому же способствует высокая надежность ЛД и большой срок их службы, превышающий, как правило, 10^4 часов [2]. В настоящее время ТЛЛДН находят применение во многих областях науки и техники.

Существуют две принципиальные схемы накачки твердотельного активного элемента (АЭ) излучением ЛД: поперечная и продольная схема накачки. С точки зрения получения излучения с высоким пространственным качеством наиболее удобной и простой является продольная схема: излучение накачки вводится в АЭ через один из его торцов вдоль оси резонатора. В такой схеме накачка узким пучком, т.е. когда радиус пятна накачки меньше радиуса нулевой моды в АЭ, обеспечивает селекцию нулевой моды [7, 8]. В четырехуровневых средах оптимальное с точки зрения достижения максимальной эффективности генерации отношение радиусов нулевой моды и пятна накачки составляет величину 1,5 и более [7]. В этом случае, как показано в [9-11], необходимо уже учитывать эффект синхронизации поперечных мод, который проявляется в так называемых критических конфигурациях. Появление таких конфигураций связано с вырождением мод по частоте [12, 13].

В ряде работ по изучению синхронизации поперечных мод в случае продольной накачки сообщалось об увеличении эффективности генерации [14] и уменьшении пороговой мощности накачки [10, 15] в критических конфигураци-

ях. Наблюдаемые явления подробно не изучались и объяснялись лучшим пространственным согласованием усиления в АЭ и формируемой модой.

В литературе практически отсутствуют работы, направленные на изучение особенностей пространственной и временной характеристик излучения при синхронизации поперечных мод в лазерах, работающих в режиме модуляции добротности.

С целью повышения качества генерируемого излучения важной задачей является идентификация положения критических конфигураций на диаграмме устойчивости резонатора. Погрешность радиусов кривизны зеркал и других элементов резонатора приводит к сдвигу от соответствующих расчетных значений положений критических конфигураций. Следует учитывать влияние тепловой линзы, которое трудно вычислить даже в приближении постоянного радиуса пучка накачки при прохождении через АЭ из-за отсутствия в литературе достоверно определенных термооптических констант для многих лазерных сред.

Таким образом, исследование критических конфигураций является важной и актуальной задачей по целому ряду причин.

В диссертационной работе представлены результаты исследований синхронизации поперечных мод в компактных твердотельных лазерах непрерывного и импульсно-периодического действия с длиной резонатора до 20 см при продольной накачке. В качестве источника накачки использовался одиночный ЛД с мощностью непрерывной генерации до 8 Вт. Для модуляции добротности твердотельных лазеров использовался акустооптический затвор. Длительность импульсов достигала 6 нс с энергией до 0,5 мДж. Исследуемый класс лазеров применяется в технологиях микроэлектроники и тонкопленочных технологиях.

Цели и задачи диссертационной работы

1. Определение влияния синхронизации поперечных мод на порог генерации твердотельных лазеров при продольной лазерной диодной накачке. Сравнение кривых зависимостей пороговой мощности накачки от длины резонатора для широко используемых сред, активированных ионами Nd^{3+} . Раз-

работка метода идентификации критических конфигураций в условиях меняющейся тепловой нагрузки.

2. Сравнение пространственных распределений интенсивности излучения при синхронизации поперечных мод в твердотельных лазерах, работающих в непрерывном режиме генерации и в режиме модуляции добротности акустооптическим затвором, с продольной лазерной диодной накачкой.
3. Исследование возможности управления генерационными характеристиками твердотельных лазеров при продольной накачке с использованием эффектов, проявляющихся в условиях синхронизации поперечных мод.
4. Определение условий и механизмов двухчастотной генерации в Nd:YLF-лазерах при продольной лазерной диодной накачке с различной геометрией активных элементов в непрерывном режиме и в режиме модуляции добротности акустооптическим затвором.

Научная новизна

1. Изучено влияние синхронизации поперечных мод на зависимости пороговой мощности накачки от длины резонатора в лазерах на основе широко используемых сред, активированных ионами Nd^{3+} , с продольной лазерной диодной накачкой.
2. Изучены особенности пространственных распределений интенсивности излучения твердотельного лазера в режиме модуляции добротности акустооптическим затвором при синхронизации поперечных мод и при генерации нулевой моды.
3. Определены условия и механизм двухчастотной генерации в Nd:YLF-лазере, работающем в непрерывном режиме, с плоско-выпуклым активным элементом при продольной лазерной диодной накачке. Исследованы условия двухчастотной генерации в Nd:YLF-лазере, работающем в непрерывном режиме и в режиме модуляции добротности акустооптическим за-

твором, с плоскопараллельным активным элементом при продольной лазерной диодной накачке.

Практическая ценность

1. Для режима модуляции добротности акустооптическим затвором твердотельных лазеров с продольной накачкой узким пучком (по отношению к радиусу нулевой моды пустого резонатора) разработана методика получения эффективной генерации излучения высокого пространственного качества ($M^2 < 1,1$). Методика реализована в Nd:YLF-лазере, применяемом в пленочных технологиях и микроэлектронике.
2. Предложен способ идентификации критических конфигураций по зависимости пороговой мощности накачки от длины резонатора в условиях меняющейся тепловой нагрузки. Разработана наглядная и легко реализуемая методика исследования особенностей синхронизации поперечных мод на основе эффекта снижения пороговой мощности накачки.
3. В Nd:YLF-лазерах при продольной лазерной диодной накачке получена одновременная генерация на длинах волн 1,047 и 1,053 мкм в режиме непрерывной генерации и в режиме модуляции добротности акустооптическим затвором. Двухчастотный лазер использован для генерации методами нелинейной оптики разностной частоты 1,64 ТГц.

Защищаемые положения

1. В лазерах с продольной накачкой локальные минимумы порога генерации при синхронизации поперечных мод соответствуют конфигурациям резонатора, удовлетворяющим условию вырождения мод по частоте. Области снижения порога генерации, обусловленного синхронизацией поперечных мод, расширяются с увеличением резонаторных потерь, число этих областей увеличивается с уменьшением диаметра пятна накачки.

2. В компактных твердотельных лазерах с продольной накачкой, резонаторы которых соответствуют нечетным значениям знаменателя дробей, описывающих условия вырождения мод по частоте, использование акустооптического затвора, расположенного около выходного зеркала, позволяет получить при синхронизации поперечных мод эффективную генерацию гигантских импульсов с пространственной структурой излучения, близкой к пространственной структуре в непрерывном режиме.
3. Бифокальность, связанная с двулучепреломлением материалов, из которых выполнены плоско-выпуклые активные элементы, приводит к пространственному расщеплению областей синхронизации поперечных мод для обыкновенной и необыкновенной волн. Использование такого расщепления в Nd:YLF-лазере с продольной накачкой позволяет получить непрерывную двухчастотную генерацию на длинах волн 1,047 и 1,053 мкм за счет выравнивания их усилений путем подбора длины резонатора.
4. При повышении средней плотности мощности продольной диодной накачки Nd:YLF-лазера увеличение длины резонатора от полуконфокальной конфигурации позволяет выровнять усиления для длин волн генерации 1,047 и 1,053 мкм за счет скачкообразного роста порога генерации в области синхронизации поперечных мод для необыкновенной волны (1,047 мкм). Такое выравнивание усилений обеспечивает в лазере с плоскопараллельным активным элементом двухчастотную генерацию на длинах волн 1,047 и 1,053 мкм в непрерывном режиме и в режиме модуляции добротности акустооптическим затвором.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах из списка ВАК РФ: «Краткие сообщения по физике» (2 статьи), «Applied Physics B», «Известия высших учебных заведений. Физика».

Результаты работы докладывались автором и обсуждались на следующих конференциях: 14th International Conference on Laser Optics «LO-2010», St. Petersburg, 28 June – 2 July 2010; Пятая всероссийская школа по лазерной физике и лазерным технологиям для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов, г. Саров, 26-29 апреля 2011; IX Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике, г. Самара, 9-13 ноября 2011; 3-ий Симпозиум по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур, Москва-Звенигород, 28-30 ноября 2011; 15th International Conference on Laser Optics «LO-2012», St. Petersburg, 25-29 June 2012; XIV Школа молодых ученых «Актуальные проблемы физики», г. Звенигород, 11-15 ноября 2012.

Автор диссертации является руководителем молодежного гранта РФФИ № 12-02-31796 «Исследование особенностей синхронизации поперечных мод в твердотельных лазерах с пространственно-неоднородной продольной диодной накачкой, условий и механизмов реализации 2-х частотной генерации».

Личный вклад автора

Автором создана установка для изучения эффекта синхронизации поперечных мод в твердотельных лазерах с продольной лазерной диодной накачкой. Экспериментальные исследования пространственной структуры излучения в непрерывном режиме генерации и в режиме модуляции добротности акустооптическим затвором, поведения порога генерации от длины резонатора лазеров с различными активными элементами, условий и механизмов двухчастотной генерации в Nd:YLF-лазерах и оптимизация Nd:YLF-лазера для технологических операций в микроэлектронике, результаты которых приведены в диссертации, выполнены автором лично или с его непосредственным участием. Автором выполнены: расчет длин резонатора, соответствующих условию вырождения мод по частоте, теоретическая оценка радиусов пятна накачки, расчет зависимостей порога генерации от длины резонатора (в последнем случае использовался программный комплекс, разработанный П.В. Кострюковым).

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы ее цели и задачи, научная новизна и практическая ценность, определены защищаемые положения, перечислены публикации автора, описана структура и краткое содержание работы, указан личный вклад автора в представленных исследованиях.

В **первой главе «Управление пространственной структурой мод и двухчастотная генерация твердотельных лазеров с продольной лазерной диодной накачкой (обзор литературы)»** представлен краткий обзор состояния исследования пространственной структуры излучения, пороговой мощности накачки при синхронизации поперечных мод и двухчастотной генерации в твердотельных лазерах с продольной лазерной диодной накачкой. Рассмотрены теоретические и экспериментальные работы, интерпретирующие физические механизмы, обуславливающие особенности синхронизации поперечных мод. Объясняются физические процессы, приводящие к двухчастотной генерации. В § 1.1 описываются особенности лазеров с продольной накачкой. Вводится параметр ξ , представляющий отношение радиуса нулевой моды w к радиусу пятна накачки ρ_n в АЭ. Обосновывается практическая ценность накачки узким пучком ($\xi > 1$). Описан механизм, приводящий к искажению пространственной структуры излучения в так называемых критических конфигурациях резонатора вследствие синхронизации поперечных мод за счет профилированного усиления. Наличие критических конфигураций связано с конфигурациями, удовлетворяющими условию вырождения мод по частоте [12]:

$$\arccos \sqrt{g_1 g_2} = \pi \frac{r}{s}, \quad (1)$$

где r/s – несократимая дробь, $g_{1,2} = 1 - \frac{L}{R_{1,2}}$ – параметры резонатора, L – длина резонатора, $R_{1,2}$ – радиусы кривизны зеркал резонатора. Рассматриваются теоретические и экспериментальные работы, в которых изучается пространственная и фазовая структура излучения на обоих зеркалах резонатора в характерных критических конфигурациях [12]; исследуется влияние параметров резонатора, ве-

личины ξ и усиления на оси резонатора на особенности синхронизации поперечных мод [13]. Отмечается, что увеличение величины ξ приводит к увеличению числа критических конфигураций. В работах [12, 13] степень отличия основной моды резонатора от нулевой моды пустого резонатора характеризуется параметром $|\beta_0|^2$, значение которого представляет собой долю мощности негауссовой основной моды, сосредоточенной в нулевой моде пустого резонатора. В § 1.2 указывается на то, что принятые в литературе формулы для расчета порога генерации не учитывают явления синхронизации поперечных мод. Снижение пороговой мощности накачки в критических конфигурациях резонатора вследствие синхронизации поперечных мод обсуждается в [10, 15]. В § 1.3 рассматриваются распространенные схемы двухчастотной генерации в твердотельных лазерах с продольной лазерной диодной накачкой. Подчеркивается перспективность создания таких устройств с целью дальнейшего получения разностной частоты, лежащей в терагерцевой области. Выводы к первой главе представлены в § 1.4.

Во второй главе «**Пространственная структура излучения при синхронизации поперечных мод в режимах непрерывной и импульсной генерации твердотельных лазеров с продольной лазерной диодной накачкой**» представлены экспериментальные результаты по изучению пространственной структуры излучения при синхронизации поперечных мод в лазерах, работающих в режиме непрерывной генерации и в режиме модуляции добротности акустооптическим затвором (АОЗ). В § 2.1 рассматривается используемая во всех экспериментах схема продольной диодной накачки. Радиус пятна накачки в области расположения АЭ может варьироваться и составлять либо $\rho_n = 60$ мкм, так называемый случай жесткой фокусировки накачки, либо $\rho_n = 125$ мкм, так называемый случай мягкой фокусировки накачки. При этом отмечается, что для всех проводимых экспериментов величина $\xi > 1$. В § 2.2 описываются результаты экспериментов, проведенных в случае жесткой фокусировки накачки, в непрерывном режиме генерации твердотельных лазеров. Приводятся зарегистрированные профили излучения Nd:YLF-лазера в 8 критических конфигурациях ($r/s = 1/4, 2/7, 3/10, 5/16, 1/3, 5/14, 3/8, 2/5$). Выявлены индивидуальные особенности в приведенных пространственных структурах излучения для лазеров с

плоско-выпуклыми АЭ на основе кристаллов Nd:YLF, Nd:YAG и керамики Nd:YAG в окрестности полуконфокальной (критической) конфигурации. Исследованы профили генерируемого излучения лазеров с плоскопараллельными АЭ на основе кристаллов Nd:YLF, Nd:YVO₄, Nd:GdVO₄, Nd:KGW, Nd:YAG, Nd:GGG, керамики Nd:YAG и Nd-стекла марки КНФС. В области синхронизации поперечных мод пространственные структуры непрерывно генерируемого излучения для лазеров с АЭ на основе распространенных сред имеют индивидуальные особенности. Наилучшим образом соотносится с полученными ранее результатами расчетов пространственная структура генерируемого излучения Nd:YLF-лазера. В § 2.3 исследуется влияние конфигурации резонатора, радиуса пятна накачки и положения АОЗ внутри резонатора твердотельного лазера на пространственную структуру генерируемого излучения, энергию и длительность импульса. Известно, что при синхронизации поперечных мод структура излучения, сформированная в резонаторе, различна для конфигураций с четным и нечетным значениями s , наибольшее отличие наблюдается в профиле излучения на выходном зеркале [12]. Эксперименты проводились в Nd:YLF-лазере с АОЗ MZ-308. В случае закрытого АОЗ, установленного около выходного зеркала полуконфокального ($r/s = 1/4$) резонатора, формируется пространственная структура излучения в виде суперпозиции поперечных мод, обеспечивающая близкую к нулю интенсивность в области акустооптического взаимодействия (рис. 1-а). Непрерывная генерация в случае закрытого АОЗ приводит к насыщению усиления, что препятствует накоплению инверсии к моменту его открытия. Увеличение частоты модуляции АОЗ (рис. 1-в, г) позволяет избежать проявления этого негативного эффекта. Установка АОЗ около выходного зеркала в случае критических конфигураций, соответствующих нечетным значениям s ($r/s = 1/5; 1/3$), позволяет получать мощные гигантские импульсы с пространственной структурой излучения на выходном зеркале в виде узкого (по отношению к диаметру нулевой моды пустого резонатора) приосевого пика на фоне широко пьедестала. Пространственная структура излучения соответствует синхронизации поперечных мод в непрерывном режиме генерации. Аналогичного поведения можно

достичь при размещении АОЗ вблизи АЭ как для четных, так и для нечетных значений s .

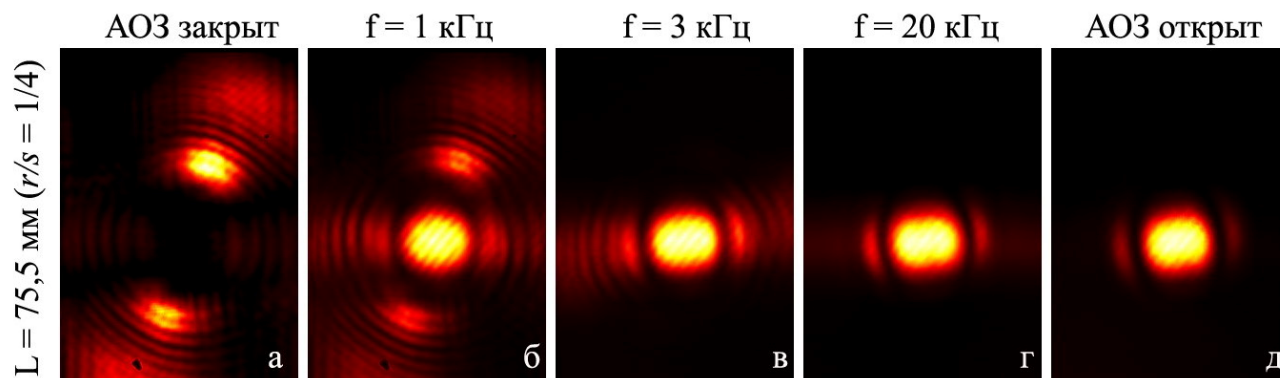


Рис. 1 – Профили генерируемого излучения Nd:YLF-лазера в полуконфокальной конфигурации: акустооптический затвор (АОЗ) закрыт (а), модуляция добротности АОЗ с различной частотой (б-г), непрерывная генерация (д) – АОЗ открыт.

Результаты оптимизации, направленной на получение мощных гигантских импульсов с пространственной структурой излучения, близкой к гауссовой, Nd:YLF-лазера с акустооптической модуляцией добротности и продольной лазерной диодной накачкой представлены в § 2.4. Показано, что при уменьшении длины резонатора от полуконфокальной конфигурации обеспечивается устойчивая генерация гигантских импульсов длительностью до 6 нс и пиковой мощностью до 80 кВт с высокими пространственными характеристиками ($M^2 < 1,1$). Увеличение длины от полуконфокальной конфигурации не обеспечивает высокого пространственного качества излучения при накачке узким пучком. Выводы ко второй главе представлены в § 2.5.

В третьей главе «Влияние синхронизации поперечных мод на порог генерации лазеров на основе активированных ионами Nd^{3+} кристаллов, керамики и стекла» представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований зависимости пороговой мощности накачки от длины (конфигурации) резонатора лазеров на основе активированных ионами Nd^{3+} сред при продольной лазерной диодной накачке ($\xi > 1$). В § 3.1 описан метод расчета пороговой мощности накачки, основанный на разложении комплексной амплитуды поля по лаггерр-гауссовым модам пустого резонатора. Приведены расчетные зависимости параметра $|\beta_0|^2$ и порога генерации от длины резонатора Nd:YLF-

лазера в приближении продольной накачки гауссовым пучком с радиусами, соответствующими жесткой и мягкой фокусировке, рис. 2.

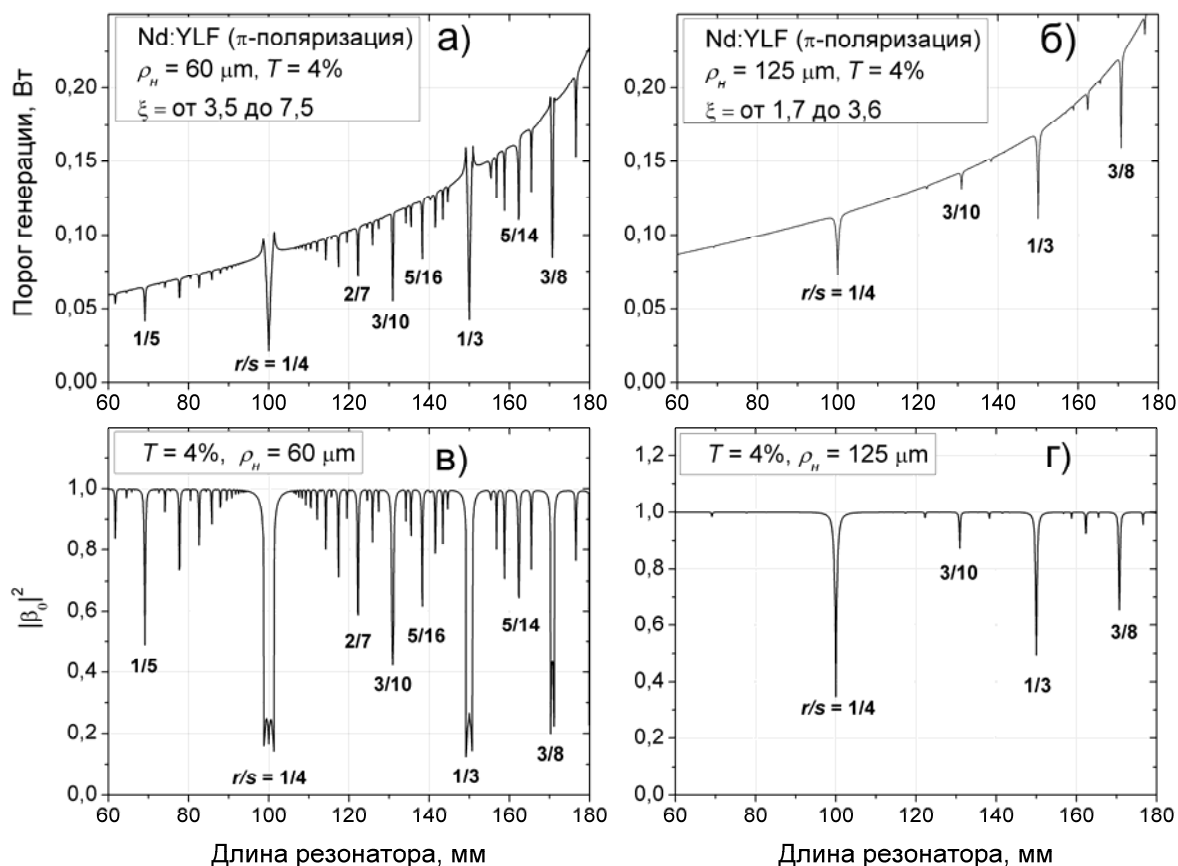


Рис. 2 – Рассчитанные зависимости порога генерации и $|\beta_0|^2$ от длины резонатора в случае кристалла Nd:YLF при коэффициенте пропускания зеркала $T = 4\%$ для радиусов накачки $\rho_n = 60$ мкм (а, в) и $\rho_n = 125$ мкм (б, г).

В критических конфигурациях происходит снижение пороговой мощности накачки вследствие синхронизации поперечных мод, приводящей к увеличению эффективного усиления за счёт лучшего пространственного согласования формируемой моды с накачкой. Поведение провалов в зависимостях пороговой мощности накачки от длины резонатора близко к поведению провалов в зависимостях параметра $|\beta_0|^2$, изученному в [12, 13]. Области снижения порога генерации, обусловленного синхронизацией поперечных мод, расширяются с увеличением резонаторных потерь, число этих областей увеличивается с уменьшением радиуса пятна накачки. Локальные минимумы порога генерации при синхронизации поперечных мод соответствуют конфигурациям резонатора, удовлетво-

ряющим условием вырождения мод по частоте. § 3.2 посвящен описанию исследуемых лазеров с продольной диодной накачкой. С целью уменьшения влияния тепловой линзы в АЭ в экспериментах использовался механический прерыватель, приводивший к импульсной, квазинепрерывной накачке. В п. 3.2.1 приводятся и обсуждаются полученные экспериментальные зависимости пороговой мощности накачки от длины (конфигурации) резонатора лазеров с плоскопараллельными АЭ на основе кристаллов Nd:YLF, Nd:YVO₄, Nd:GdVO₄ и Nd:KGW в случае жесткой фокусировки накачки, рис. 3.

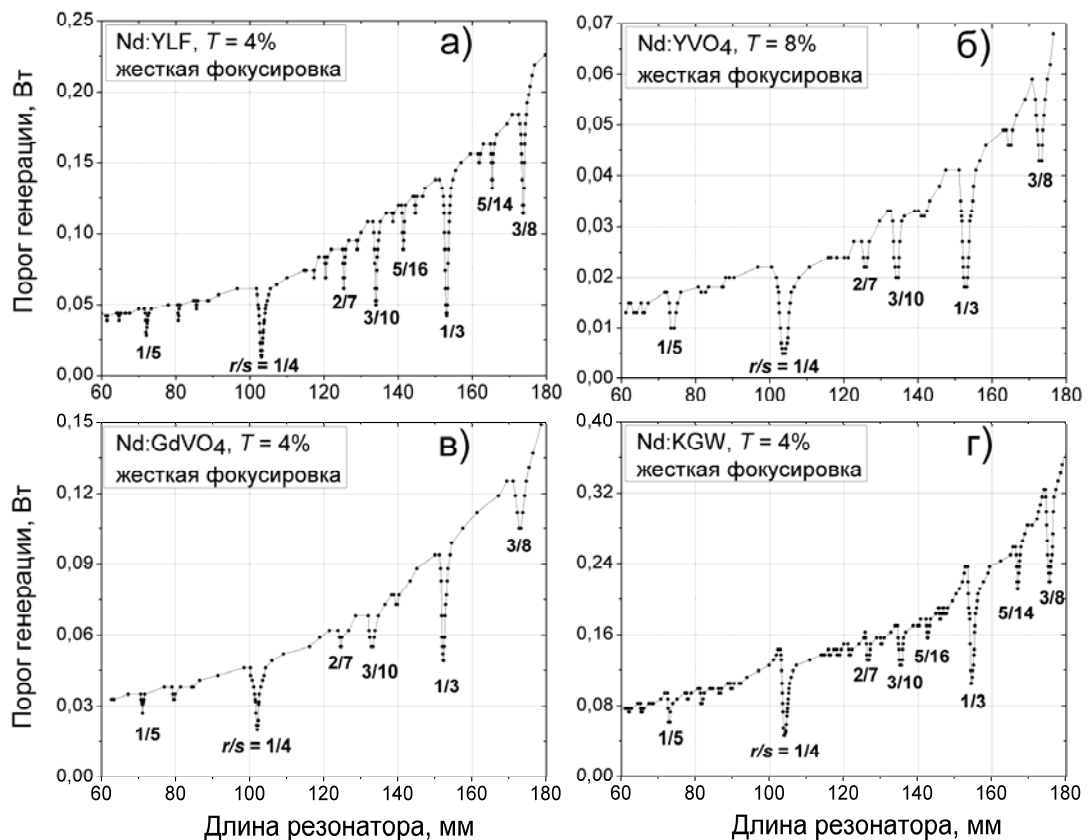


Рис. 3 – Зависимости порога генерации от длины резонатора лазеров с активными элементами на основе кристаллов Nd:YLF (а), Nd:YVO₄ (б), Nd:GdVO₄ (в) и Nd:KGW (г) при жесткой фокусировке накачки.

Количество наблюдаемых в эксперименте локальных минимумов порога генерации, их величина и форма провалов порога генерации в зависимостях от длины резонатора лазера с АЭ на основе кристалла Nd:YLF наилучшим образом согласуются с расчётами. Зависимости пороговой мощности накачки лазеров с АЭ на основе кристаллов Nd:YVO₄, Nd:GdVO₄ и Nd:KGW близки к случаю Nd:YLF-

лазера. Экспериментально подтверждено, что увеличение резонаторных потерь сопровождается расширением областей снижения порога генерации, обусловленного синхронизацией поперечных мод, число этих областей увеличивается с уменьшением радиуса пятна накачки. В п. 3.2.2 представлены экспериментальные зависимости пороговой мощности накачки от длины (конфигурации) резонатора лазеров с плоскопараллельными АЭ на основе кристаллов Nd:YAG, Nd:GGG, керамики Nd:YAG и Nd-стекла марки КНФС в случае жесткой фокусировки накачки, рис. 4.

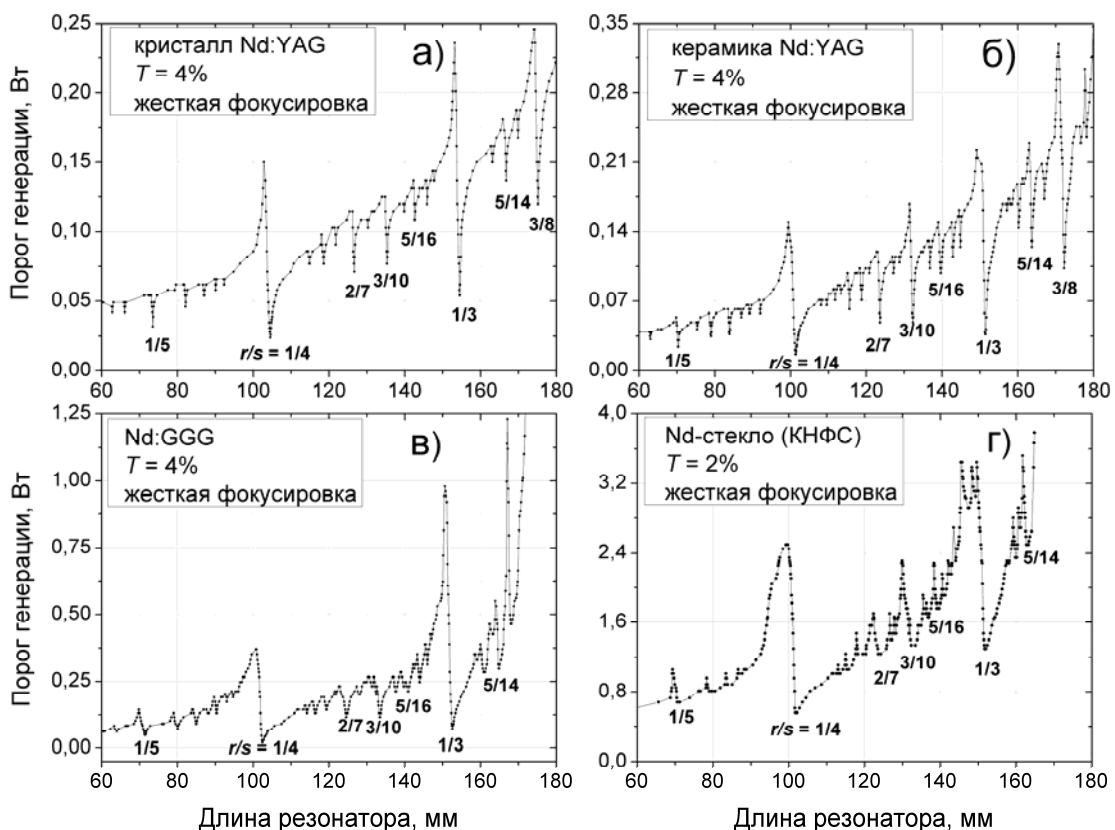


Рис. 4 – Зависимости порога генерации от длины резонатора лазеров с активными элементами на основе кристалла Nd:YAG (а), керамики Nd:YAG (б), кристалла Nd:GGG (в) и Nd-стекла марки КНФС (г) при жесткой фокусировке накачки.

Обнаружен эффект скачка пороговой мощности накачки при уменьшении длины резонатора от ряда конфигураций, соответствующих условию (1) вырождения мод по частоте. Представлены результаты по исследованию влияния диаметра внутрирезонаторной диафрагмы и значения параметра ξ на величину скачка порога генерации. Показано, что в области скачков пороговой мощности накачки

наблюдается сложная пространственная структура излучения с существенно негауссовым профилем. Несмотря на то, что ход кривых порога генерации от длины резонатора индивидуален для исследованных лазеров на основе различных активных сред, локальные минимумы порога генерации при синхронизации поперечных мод с высокой степенью точности соответствуют конфигурациям резонатора, удовлетворяющим условию вырождения мод по частоте, таблица 1.

Таблица 1. Расчетные значения длин резонатора L_p для соответствующих дробей r/s и используемых в исследованиях активных элементов и экспериментальные значения положения локальных минимумов порога генерации $L_э$.

r/s		1/5	1/4	2/7	3/10	5/16	1/3	5/14	3/8
кристалл Nd:YLF	L_p , мм	72,3	103,1	125,4	134,1	141,5	153,1	165,5	173,9
	$L_э$, мм	72,1	103,2	125,4	134,0	141,4	153,1	165,4	173,8
кристалл Nd:YVO ₄	L_p , мм	74,5	105,3	127,6	136,3	143,7	155,3	167,7	176,1
	* L_p , мм	73,1	103,3	125,2	133,7	140,9	152,3	164,5	172,7
	$L_э$, мм	73,2	103,3	125,2	133,8	140,7	152,3	164,2	172,5
кристалл Nd:GdVO ₄	L_p , мм	71,3	102,1	124,4	133,1	140,5	152,1	164,5	172,9
	$L_э$, мм	71,1	102,1	124,6	132,2	139,7	152,2	–	173,0
кристалл Nd:KGW	L_p , мм	72,1	102,9	125,2	133,9	141,3	152,9	165,3	173,7
	* L_p , мм	72,8	103,9	126,4	135,2	142,7	154,4	166,9	175,4
	$L_э$, мм	72,9	103,9	126,5	135,3	142,6	154,4	166,9	175,5
кристалл Nd:YAG	L_p , мм	73,7	104,5	126,8	135,5	142,9	154,5	166,9	175,3
	$L_э$, мм	73,5	104,5	126,7	135,3	142,7	154,5	166,8	175,2
керамика Nd:YAG	L_p , мм	70,5	101,3	123,6	132,3	139,7	151,3	163,7	172,1
	$L_э$, мм	70,4	101,4	123,6	132,3	139,6	151,4	163,7	172,2
кристалл Nd:GGG	L_p , мм	71,6	102,4	124,7	133,4	140,8	152,4	164,8	173,2
	$L_э$, мм	71,5	102,5	124,5	133,5	140,9	152,6	164,9	173,3
Nd-стекло КНФС	L_p , мм	71,1	101,9	124,2	132,9	140,3	151,9	164,3	172,7
	$L_э$, мм	70,9	101,9	124,0	132,8	139,6	151,9	–	–

* L_p – расчетные значения с учетом подгоночного параметра кривизны, обусловленного погрешностью обработки (полировки) торцов АЭ. Для АЭ на основе кристаллов Nd:YVO₄ и Nd:KGW параметры составили 8,55 м и -19,6 м соответственно.

В п. 3.2.3 представлены экспериментальные зависимости пороговой мощности накачки от длины (конфигурации) резонатора лазеров с плоско-выпуклыми АЭ на основе кристалла Nd:YAG и керамики Nd:YAG. В § 3.3 описан предложенный метод определения положения критических конфигураций в условиях меняющейся тепловой нагрузки АЭ. Выводы к третьей главе представлены в § 3.4.

В четвертой главе «Двухчастотная генерация в Nd:YLF-лазерах с продольной лазерной диодной накачкой» обсуждаются реализованные экспериментально способы генерации двухчастотного излучения на ортогонально поляризованных длинах волн 1,047 и 1,053 мкм в Nd:YLF-лазерах с АЭ различной геометрией. В § 4.1 предложена оригинальная конструкция лазера с плоско-выпуклым АЭ для получения двухчастотной непрерывной генерации. Показано, что главным образом бифокальность анизотропного АЭ приводит для длин волн 1,047 и 1,053 мкм к пространственному расщеплению критических конфигураций (рис. 5), в окрестности которых происходит резкое снижение пороговой мощности накачки вследствие синхронизации поперечных мод. Такое расщепление позволяет выровнять усиления (пороги генерации) для соответствующих длин волн путем изменения длины (конфигурации) резонатора.

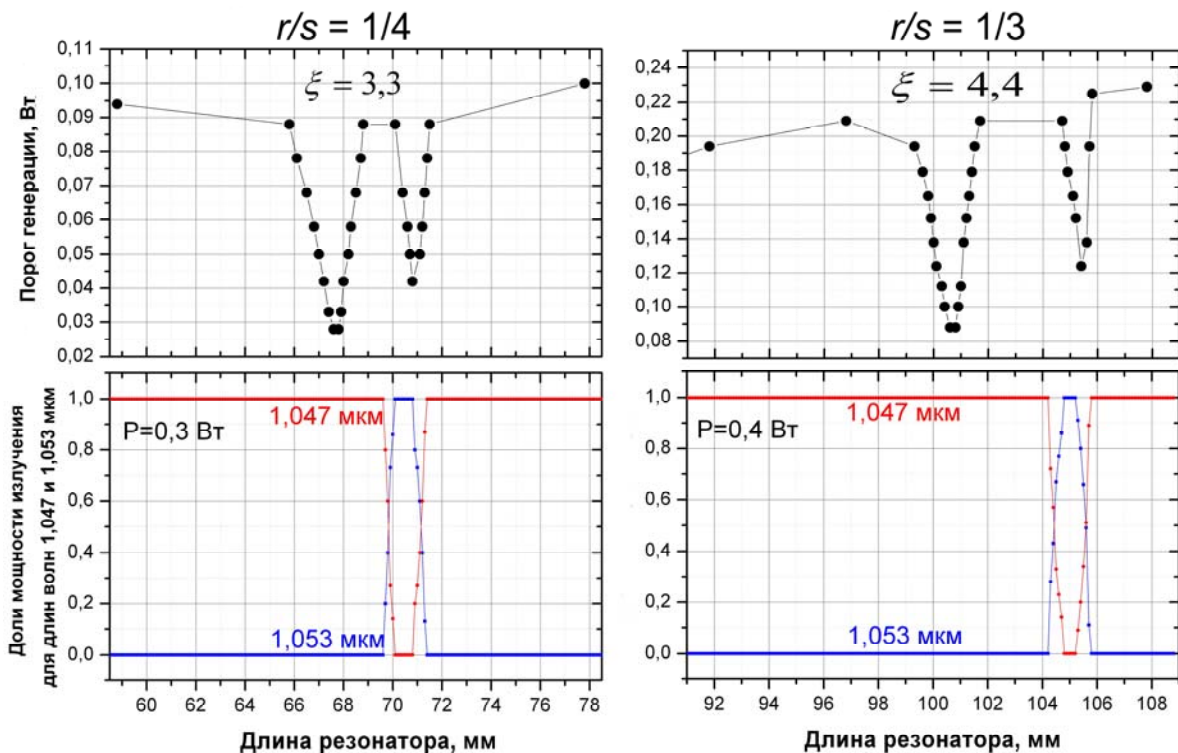


Рис. 5 – Зависимости порога генерации и долей мощности излучения на длинах волн 1,047 и 1,053 мкм от длины резонатора Nd:YLF-лазера с плоско-выпуклым активным элементом вблизи критических конфигураций $r/s = 1/4, 1/3$ при жесткой фокусировке накачки.

В § 4.2 обсуждаются результаты экспериментально обнаруженного эффекта скачкообразного роста порога генерации для длины волны 1,047 мкм Nd:YLF-

лазера при повышении средней плотности мощности продольной лазерной диодной накачки. Скачок наблюдается при увеличении длины резонатора от конфигураций, удовлетворяющих условию (1) вырождения мод по частоте. При достаточной плотности мощности накачки порог генерации для длины волны 1,047 мкм может достигать порога генерации для длины волны 1,053 мкм. Эффект использован для получения двухчастотной непрерывной генерации в Nd:YLF-лазере с полуконфокальным резонатором и плоскопараллельным АЭ. Результаты экспериментов по исследованию двухчастотной генерации в режиме модуляции добротности АОЗ в таком лазере приведены в § 4.3. Получена устойчивая одновременная генерация гигантских импульсов на длинах волн 1,047 и 1,053 мкм длительностью 13 нс с пиковой мощностью 7,5 кВт. Выводы к четвертой главе представлены в § 4.4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе теоретически и экспериментально исследованы генерационные характеристики и двухчастотный режим при синхронизации поперечных мод. Эксперименты проводились на созданной диссертантом установке, обеспечивающей работу компактных твердотельных лазеров непрерывного и импульсно-периодического действия с продольной лазерной диодной накачкой.

Ниже перечислены полученные **основные результаты**.

1. Сравнительный анализ показал, что в области синхронизации поперечных мод пространственные структуры непрерывно генерируемого излучения для лазеров с активными элементами на основе распространенных сред имеют индивидуальные особенности. Наилучшим образом соотносится с полученными ранее результатами расчетов пространственная структура генерируемого излучения Nd:YLF-лазера.
2. В компактных твердотельных лазерах с продольной накачкой, резонаторы которых соответствуют нечетным значениям знаменателя дробей, описывающих условия вырождения мод по частоте, использование акустооптического затвора, расположенного около выходного зеркала, позволяет по-

лучить при синхронизации поперечных мод эффективную генерацию гигантских импульсов с пространственной структурой излучения на выходном зеркале в виде узкого (по отношению к диаметру нулевой моды пустого резонатора) приосевого пика на фоне широко пьедестала. Найдены конфигурации резонатора Nd:YLF-лазера, в которых генерируется излучение с высокими пространственным качеством ($M^2 < 1,1$) и временной стабильностью импульсов длительностью до 6 нс и энергией до 0,5 мДж. Проведены эксперименты по использованию такого лазера в тонкопленочных технологиях: получены отверстия диаметром 20 мкм в кремниевой пластине толщиной 200 мкм.

3. Разработана методика исследования особенностей синхронизации поперечных мод на основе измерения порога генерации в критических конфигурациях лазеров с продольной накачкой. Показано, что в области синхронизации поперечных мод происходит снижение порога генерации лазеров вследствие увеличения эффективного усиления за счёт лучшего пространственного согласования формируемой моды с накачкой. Области снижения порога генерации, обусловленного синхронизацией поперечных мод, расширяются с увеличением резонаторных потерь, число этих областей увеличивается с уменьшением радиуса пятна накачки.
4. При продольной накачке узким пучком ход кривых порога генерации от длины резонатора индивидуален для исследованных лазеров на основе широко используемых активных сред (кристаллы Nd:YLF, Nd:YVO₄, Nd:GdVO₄, Nd:KGW, Nd:YAG, Nd:GGG, керамика Nd:YAG и Nd-стекло марки КНФС). При этом локальные минимумы порога генерации при синхронизации поперечных мод с высокой степенью точности соответствуют рассчитанным методом матричной оптики конфигурациям резонатора, удовлетворяющим условию вырождения мод по частоте.
5. Предложены и реализованы новые способы генерации двухчастотного излучения на длинах волн 1,047 и 1,053 мкм (π - и σ -поляризации соответ-

венно) Nd:YLF-лазера с активными элементами различной геометрии при продольной накачке:

- а) Первый способ основан на применении бифокального плоско-выпуклого активного элемента, использование которого приводит к пространственному расщеплению областей синхронизации поперечных мод для π - и σ -поляризаций и дает возможность выровнять их усиления изменением длины резонатора. Получена непрерывная двухчастотная генерация по 0,25 Вт на каждой из длин волн.
- б) Второй способ основан на использовании экспериментально обнаруженного в условиях непрерывной накачки плотностью мощности более 10^4 Вт/см² явления скачкообразного возрастания порога генерации для π -поляризации при увеличении длины резонатора лазера от областей синхронизации поперечных мод. Получена одновременная генерация гигантских импульсов на длинах волн 1,047 и 1,053 мкм длительностью 13 нс с пиковой мощностью 7,5 кВт в лазере с плоскопараллельным активным элементом при модуляции добротности акустооптическим затвором.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Besotosnii V., Cheshev E., Gorbunkov M., Kostryukov P., Krivonos M., Tunkin V., Jakovlev D. Diode end-pumped acousto-optically Q-switched compact Nd:YLF laser // Applied Physics B. 2010. V. 101. P. 71–74.
2. Безотосный В.В., Кривонос М.С., Попов Ю.М., Чешев Е.А., Тункин В.Г., Горбунков М.В., Кострюков П.В. Твердотельные лазеры с лазерной диодной накачкой на основе Nd:YLF // Известия высших учебных заведений. Физика. 2011. Т. 54. № 2/2. С. 73-78.
3. Безотосный В.В., Горбунков М.В., Кострюков П.В., Кривонос М.С., Попов Ю.М., Тункин В.Г., Чешев Е.А. Двухчастотная генерация в Nd:YLF-лазере с линзоподобным активным элементом и продольной диодной накачкой // Краткие сообщения по физике. 2011. № 10. С. 43-51.

4. Безотосный В.В., Горбунков М.В., Кострюков П.В., Кривонос М.С., Попов Ю.М., Тункин В.Г., Чешев Е.А. Порог генерации лазеров на Nd-активированных кристаллах, керамике и стеклах при пространственно неоднородной диодной накачке // Краткие сообщения по физике. 2013. Т. 40. № 3. С. 3-12.
5. Besotosnii V., Cheshev E., Gorbunkov M., Kostrukov P., Krivonos M., Tunkin V., Jakovlev D. Transverse mode locking in diode end-pumped compact Nd:YAG, ceramic Nd:YAG and Nd:YLF lasers // Technical Program of 14th International Conference on Laser Optics «LO-2010» (St. Petersburg, 28 June – 2 July 2010). 2010. P. 565.
6. Кривонос М.С. Исследование особенностей работы твердотельного лазера с торцевой диодной накачкой в импульсном и непрерывном режимах // Сборник трудов XIII Школы молодых ученых «Актуальные проблемы физики». 2010 (Звенигород-Москва, 14-19 ноября 2010). 2010. С. 18-19.
7. Безотосный В.В., Горбунков М.В., Кострюков П.В., Кривонос М.С., Попов Ю.М., Тункин В.Г., Чешев Е.А. Двухчастотная генерация в Nd:YLF-лазере с продольной диодной накачкой // Сборник докладов Пятой всероссийской школы по лазерной физике и лазерным технологиям для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов (г. Саров, 26-29 апреля 2011). 2011. С. 183-190.
8. Кривонос М.С., Попов Ю.М. Особенности двухчастотной генерации в Nd:YLF-лазере при неоднородной продольной накачке // Сборник конкурсных докладов IX Всероссийского молодежного Самарского конкурса-конференции научных работ по оптике и лазерной физике (Самара, 9-13 ноября 2011). 2011. С. 289-295.
9. Безотосный В.В., Горбунков М.В., Коромыслов А.Л., Кривонос М.С., Тункин В.Г., Чешев Е.А. Механизм двухчастотной генерации в Nd:YLF лазерах с линзоподобным и плоскопараллельным активными элементами // Сборник трудов 5 Всероссийской молодежной конференции «Инноваци-

онные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики» (Москва, 14-16 ноября 2011). 2011. С. 53.

10. Besotosnii V.V., Gorbunkov M.V., Kostrukov P.V., Krivonos M.S., Popov Y.M., Tunkin V.G., Cheshev E.A. Influence of resonator configurations on mode profiles and threshold in non-homogeneously diode end-pumped Nd-doped lasers // Technical Program of 15th International Conference on Laser Optics «LO-2012» (St. Petersburg, 25-29 June 2012). 2012. P. 269.
11. Безотосный В.В., Горбунков М.В., Кострюков П.В., Кривонос М.С., Попов Ю.М., Тункин В.Г., Чешев Е.А. Пороговые зависимости и пространственная структура излучения при синхронизации поперечных мод в твердотельных лазерах с продольной накачкой // Сборник трудов XIV Школы молодых ученых «Актуальные проблемы физики» (Звенигород, 11-15 ноября 2012). 2012. С. 129-130.

СПИСКО ЦИТИРУЕМОЙ В АВТОРЕФЕРАТЕ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Burns G., Nathan M.I. P-N junction lasers // Proceedings of the IEEE. 1964. V. 52. P. 770-794.
2. Hughes D.W., Bar J.R.M. Laser diode pumped solid state lasers // Journal of Physics D: Applied Physics. 1991. V. 25. P. 563-586.
3. Кравцов Н.В. Основные тенденции развития твердотельных лазеров с полупроводниковой накачкой // Квантовая электроника. 2001. V. 31. № 8. P. 661-677.
4. Zehetner J. Highly efficient diode-pumped elliptical mode Nd:YLF laser // Optics Communications. 1995. V. 117. P. 273-276.
5. Fujikawa S., Furuta K., Yasui K. 28 % electrical-efficiency operation of a diode-side-pumped Nd:YAG rod laser // Optics Letters. 2001. V. 26. № 9. P. 602-604.
6. Minassian A., Thompson B., Damzen M.J. Ultrahigh-efficiency TEM₀₀ diode-side-pumped Nd:YVO₄ laser // Applied Physics B. 2003. V. 76. P. 341-143.

7. Laporta P., Brussard M. Design criteria for mode size optimization in diode-pumped solid-state lasers // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1991. V. 27. № 10. P. 2319-2326.
8. Sanches F., Brunel M., Ait-Ameur K. Pump saturation effects in end-pumped solid-state lasers // Journal of the Optical Society of America B. 1998. V. 15. № 9. P. 2390-2394.
9. Zhang O., Ozygus B., Weber H. Degeneration effects in laser cavities // The European Physical Journal – Applied Physics. 1999. V. 6. P. 293-298.
10. Wu H.-H., Sheu C.-C., Chen T.-W., Wei M.-D., Hsieh W.-F. Observation power drop and low threshold due to beam waist shrinkage around critical configurations in an diode-pumped Nd:YVO₄ laser // Optics Communications. 1999. V. 165. P. 225-229.
11. Martel G., Labbe C., Sanches F., Frimager M., Ait-Ameur K. Non-Gaussian fundamental mode laser oscillation in end-pumped Nd:YVO₄ microchip laser. Optics Communications. 2002. V. 201. P. 117-127.
12. Горбунков М.В., Кострюков П.В., Телегин Л.С., Тункин В.Г., Яковлев Д.В. Особенности структуры основной моды лазеров с устойчивыми резонаторами при пространственно неоднородном усилении // Квантовая электроника. 2007. Т. 37. № 2. С. 173-180.
13. Горбунков М.В., Кострюков П.В., Тункин В.Г. Влияние параметров резонатора и пространственно неоднородного усиления на пространственную структуру основной моды лазеров с устойчивыми резонаторами // Квантовая электроника. 2008. Т. 38. С. 689-694.
14. Dingnjan J., van Exter M.P., Woerdman J.P. Geometric modes in a single-frequency Nd:YVO₄ laser // Optics Communications. 2001. V. 188. P. 345-351.
15. Chen C.-H., Tai P.-T., Hsieh W.-F., Wei M.-D. Multibeam-waist modes in an end-pumped Nd:YVO₄ laser // Journal of the Optical Society America B. 2003. V. 20. № 6. P. 1220-1226.