

На правах рукописи

Акулов Владимир Александрович

**Исследование перестроечных характеристик
непрерывного иттербиевого волоконного лазера с
внутрирезонаторным удвоением частоты в
кристалле КТР**

01.04.05 «Оптика»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении
науки Институте автоматики и электрометрии Сибирского отделения
Российской академии наук
(ИАиЭ СО РАН)

Научный руководитель кандидат физико-математических наук
Каблуков Сергей Иванович

Официальные оппоненты: Скворцов Михаил Николаевич
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учре-
ждение науки Институт лазерной физики Сибир-
ского отделения Российской академии наук,
руководитель группы

Суровцев Николай Владимирович
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учре-
ждение науки Институт автоматики и электромет-
рии Сибирского отделения Российской академии
наук,
заведующий лабораторией

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт общей физики
им. А. М. Прохорова Российской академии наук

Защита состоится «10» июня 2013 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертаци-
онного совета Д 003.005.01 при Федеральном государственном бюджетном
учреждении науки Институте автоматики и электрометрии Сибирского отде-
ления Российской академии наук, по адресу: 630090, Новосибирск, проспект
Академика Коптюга, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАиЭ СО РАН.

Автореферат разослан «7» мая 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

д. ф.-м. н.

Насыров К. А.

Общая характеристика работы

Актуальность

Обладая рядом преимуществ по сравнению с традиционными лазерными источниками, волоконные лазеры используются наравне с другими типами лазеров, а в некоторых случаях и заменяют их. Помимо высокой эффективности преобразования накачки к преимуществам волоконных лазеров также можно отнести высокое качество выходного пучка, определяемое волноводными свойствами оптоволокна; отсутствие водяного охлаждения; простоту эксплуатации и надежность ввиду отсутствия объемной оптики, требующей юстировки.

Иттербиевые волоконные лазеры (ИВЛ) являются одними из наиболее изучаемых объектов в последние десять лет благодаря высокой эффективности преобразования излучения накачки, достигающей $\sim 80\%$ [1]. Привлекательность ИВЛ и их потенциал генерировать большую мощность были признаны еще в девяностых годах XX века [2]. Еще одной важной особенностью ИВЛ является широкий спектр люминесценции, позволяющий получать генерацию на любой длине волны от 975 до 1180 нм [2, 3]. Более того, чувствительность длины волны отражения волоконной брэгговской решетки (ВБР), являющейся зеркалом резонатора волоконного лазера, к изменениям температуры и деформациям [4] дает возможность создавать перестраиваемые лазеры в полностью волоконном исполнении.

Волоконные лазеры различных конфигураций способны перекрыть достаточно широкий диапазон длин волн в ближней инфракрасной области от 0,9 до 2,2 мкм. Однако во многих практических и научных применениях требуется излучение видимого диапазона. Лазерные источники видимого излучения мощностью несколько сотен милливатт крайне важны, в частности для медицинских применений. К тому же, благодаря достаточно простой перестройке длины волны генерации волоконных лазеров на основе ВБР, создание перестраиваемых в видимом диапазоне источников на базе волоконных лазеров открывает новые горизонты их практических применений. Приоритетным направлением в разработке подобных волоконных источников является удвоение частоты генерации волоконных лазеров.

В большинстве случаев для преобразования частоты генерации волоконных лазеров используют внрезонаторные схемы [5] и генерацию второй гармоники (ГВГ) во внешнем резонаторе [6]. Данные методы преобразования частоты генерации являются достаточно эффективными, но их использование накладывает высокие требования к выходному излучению самого волоконного лазера. Так, во внрезонаторных схемах обычно используются кристаллы с регулярной доменной структурой, поэтому выходное излучение волокон-

ного лазера должно быть узкополосным и линейно поляризованным. Для преобразования частоты генерации во внешнем резонаторе требуется одночастотное излучение. Несмотря на высокую эффективность преобразования, эти методы достаточно сложно применить для создания волоконных лазерных источников видимого излучения, перестраиваемых в широком диапазоне длин волн.

Для преобразования частоты генерации твердотельных лазеров обычно используются внутрирезонаторные схемы. Однако первые попытки по внутрирезонаторной ГВГ волоконных лазеров на вынужденном комбинационном рассеянии, обычно имеющих случайную поляризацию, не принесли высоких результатов. В работах [7, 8] было получено лишь 10 мВт второй гармоники при уровне мощности излучения иттербиевой накачки 12 Вт.

Исходя из вышесказанного, можно заключить, что одним из наиболее актуальных практических вопросов является создание достаточно простых схем генерации второй гармоники излучения перестраиваемых волоконных лазеров.

Цель работы

Цель диссертационной работы состоит в экспериментальном исследовании перестроечных характеристик непрерывного иттербиевого волоконного лазера с внутрирезонаторным удвоением частоты.

Задачи работы

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Оптимизировать схему перестраиваемого ИВЛ для преобразования его излучения во вторую гармонику.
2. Для преобразования частоты генерации ИВЛ со случайной поляризацией выбрать нелинейный кристалл и рассчитать его геометрию для наиболее эффективной ГВГ с перестройкой частоты в широком спектральном диапазоне.
3. Выявить и исследовать различные эффекты, влияющие на эффективность внутрирезонаторной ГВГ перестраиваемого ИВЛ.

Научная новизна

Предложено использование кристаллов KTiOPO_4 (КТР) со вторым типом синхронизма для эффективного преобразования частоты генерации непрерывного ИВЛ со случайной поляризацией. Показано, что наклонное падение

излучения на поверхность кристалла позволяет скомпенсировать эффект сноса для фиксированной длины волны и добиться достаточно высокой эффективности ГВГ в широком диапазоне длин волн перестраиваемого ИВЛ за счет изменения угла наклона кристалла.

При перестройке частоты в схеме с внутррезонаторной ГВГ проявляются эффекты, связанные с разностью фаз второй гармоники при генерации на прямом и обратном проходе через кристалл. Это изменение фазы влияет на мощность второй гармоники. Предложенный метод компенсации фазовых эффектов за счет внесения дополнительного дисперсионного элемента внутрь резонатора позволил добиться плавной зависимости мощности второй гармоники от длины волны генерации перестраиваемого ИВЛ в диапазоне более 20 нм.

Впервые достигнут уровень мощности второй гармоники 400 мВт при внутррезонаторном удвоении частоты ИВЛ с многомодовой диодной накачкой мощностью 18 Вт.

Практическая значимость

Метод внутррезонаторной ГВГ широко используется для эффективного преобразования частоты твердотельных лазеров. Что касается применения данного метода к стандартным ИВЛ, то он имеет ряд ограничений, связанных с уширением спектра при росте мощности. Уширение спектра уменьшает добротность резонатора и тем самым не позволяет получить столь же высокую эффективность преобразования, как в случае с твердотельными лазерами. Тем не менее экспериментально продемонстрирован уровень мощности в несколько сотен милливатт, достаточный для таких приложений, как проточная цитометрия и рамановская спектроскопия.

Иттербиевые волоконные лазеры с внутррезонаторной ГВГ обладают компактными размерами, высокими эксплуатационными характеристиками, а также возможностью плавной перестройки частоты в широком диапазоне. Благодаря данным преимуществам, ИВЛ с внутррезонаторной ГВГ в некоторых приложениях могут послужить заменой громоздким, сложным в эксплуатации перестраиваемым лазерам на красителях, для накачки которых к тому же требуется достаточно мощное видимое излучение твердотельных либо ионных лазеров. Перестраиваемые ИВЛ видимого диапазона также могут найти новые применения, для которых уровень мощности ~ 100 мВт является достаточным. Например, в рамановской спектроскопии при изучении новых образцов требуется отличать линии комбинационного рассеяния от линий люминесценции. Перестройка длины волны приведет к смещению линий комбинационного рассеяния, а положение линий люминесценции останется неизменным.

Апробация работы

Материалы, изложенные в диссертации, докладывались на следующих семинарах и конференциях: Advanced Solid State Photonics 2007 (28-31 January, 2007, Vancouver, Canada); 13th Int. Conf. on Methods of Aerophysical Research, ICMAR 2007 (5-10 February, 2007, Novosibirsk, Russia); 1-й Российский семинар по волоконным лазерам (4-6 апреля 2007 г., Новосибирск, Россия); ICONO-LAT 2007 (May 28 – June 1, 2007, Minsk, Belarus); 13th Int. Conf. "Laser Optics" (24-27 June 2008, St. Petersburg, Russia); 5th Int. Symposium Modern Problems of Laser Physics (24-30 August 2008, Novosibirsk, Russia); 19th International Laser Physics Workshop LPHYS (5-9 July 2010, Foz do Iguaçu, Brazil); 5-й Российский семинар по волоконным лазерам (27-30 марта 2012 г., Новосибирск, Россия). Результаты также докладывались на научных семинарах ИАиЭ СО РАН (21 октября 2010 г. и 1 ноября 2012 г.).

Защищаемые положения

1. В кристалле КТР с синхронизмом второго типа возможно эффективное внутрирезонаторное удвоение частоты генерации непрерывного иттербиевого волоконного лазера со случайной поляризацией.
2. Удвоение частоты непрерывного случайно поляризованного излучения иттербиевого волоконного лазера с перестройкой в широком диапазоне осуществляется в кристалле КТР с компенсацией сноса излучения на фиксированной длине волны. Изменение частоты второй гармоники достигается путем синхронной перестройки волоконной брэгговской решетки лазера и поворота кристалла.
3. Увеличение эффективности генерации второй гармоники за счет увеличения внутрирезонаторной мощности излучения на основной частоте ограничено спектральными потерями, связанными с уширением спектра генерации иттербиевого волоконного лазера при росте мощности.
4. Диапазон плавной перестройки иттербиевого волоконного лазера с внутрирезонаторной генерацией второй гармоники ограничен интерференционными эффектами, возникающими из-за разности фаз второй гармоники при генерации на прямом и обратном проходе через нелинейный кристалл. Компенсация дисперсии расширяет диапазон плавной перестройки.

Личный вклад автора

Основные результаты, изложенные в работе, получены автором лично. Он активно участвовал во всех этапах исследований: от планирования экспериментов до обсуждения результатов, теоретического анализа и подготовки статей.

Публикации

Соискатель имеет 10 опубликованных работ по теме диссертации, включая материалы конференций и семинаров. Четыре работы [А1–А4] опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы, а также списка обозначений и сокращений. Работа изложена на 100 страницах текста, содержит 43 рисунка и 2 таблицы. Список литературы имеет 106 наименований.

Основное содержание работы

Во введении описана область, в которой проводились исследования; приведен обзор публикаций, подтверждающий актуальность работы; сформулированы цели работы и защищаемые положения. Также изложено основное содержание материала по главам.

Первая глава посвящена общим принципам работы иттербиевых волоконных лазеров. Глава состоит из двух параграфов. В первом параграфе приведены основные сведения о процессе генерации волоконного лазера на основе иттербиевого волоконного световода. Рассмотрена аналитическая модель генерации ИВЛ, описывающая зависимость выходной мощности лазера от мощности накачки. Во втором параграфе описаны методы перестройки длины волны генерации ИВЛ с помощью ВБР. Также представлены различные способы накачки в активное волокно с двойной оболочкой. Выбор схемы ИВЛ определялся простотой исполнения и доступностью компонентов. Для выбранной схемы были проведены измерения выходной мощности лазера в зависимости от мощности многомодовой накачки. Эффективность преобразования излучения накачки в лазерную генерацию составила 76%. Проведено сравнение полученной зависимости выходной мощности с аналитической мо-

делью. Отклонение от теории выявило необходимость в термостабилизации лазерных диодов накачки.

Во второй главе приведено описание перестройки и удвоения частоты генерации ИВЛ во внерезонаторной схеме. Глава состоит из четырех параграфов. В третьем параграфе описаны общие свойства двуосных кристаллов, в том числе снос излучения необыкновенной волны, влияющий на эффективность преобразования во вторую гармонику, и метод компенсации сноса для заданной длины волны за счет наклонного падения на поверхность кристалла [9]. Также приводятся зависимости показателя преломления от длины волны и температуры для кристалла КТР, необходимые для расчета геометрии кристалла. Описан пример расчета геометрии кристалла КТР с синхронизмом в плоскости XZ , с помощью которого можно определять геометрические параметры кристалла, позволяющие компенсировать разбегание лучей обыкновенной и необыкновенной волн излучения на основной частоте для фиксированной длины волны. В четвертом параграфе исследуется влияние фокусировки пучка излучения основной частоты в кристалл на эффективность преобразования во вторую гармонику. Экспериментальные данные позволяют выбрать оптимальный набор линз для дальнейших экспериментов.

Далее для трех различных геометрий кристалла КТР с синхронизмом в плоскости XZ приведены расчетные значения угла сноса, углов между лучами обыкновенной и необыкновенной волн и углов падения излучения на поверхность кристалла в зависимости от длины волны синхронизма. На рис. 1б показаны зависимости углов разбегания лучей от длины волны для этих трех геометрий. Данные зависимости позволяют определить длину волны, на которой преобразование во вторую гармонику будет максимальным для определенного кристалла. Оптимум соответствует нулевому значению угла между лучами. Видно, что в этом случае разбегание лучей обыкновенной и необыкновенной волн компенсируется за счет наклонного падения на длинах волн ~ 1081 , 1090 и 1102 нм. Также зависимости углов между лучами от длины волны позволяют оценить диапазон длин волн, в котором преобразование во вторую гармонику возможно без значительных потерь эффективности.

Стоит отметить, что выбором геометрии кристалла можно реализовать скалярный синхронизм, выполняющийся при нормальном падении. В этом случае в плоскости XZ разбегание лучей обыкновенной и необыкновенной волн основного излучения составит $5,5$ мрад, $13,5$ мрад и $19,7$ мрад для длин волн 1081 , 1090 и 1102 нм соответственно. Таким образом, наклонное падение на поверхность кристалла позволяет не только полностью компенсировать разбегание лучей для выбранной геометрии кристалла на фиксированной длине волны, но и значительно его уменьшить в достаточно широком спектральном диапазоне (рис. 1б).

В этой же главе описана экспериментальная установка по удвоению ча-

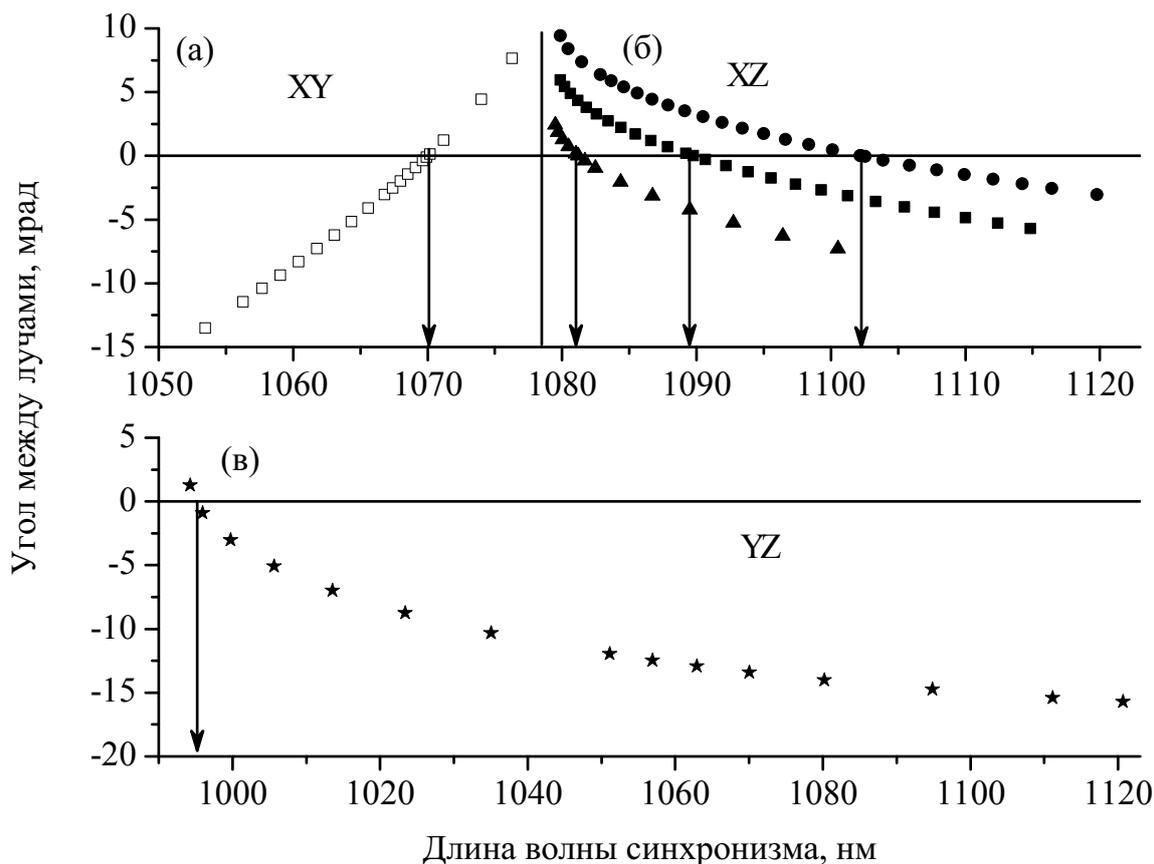


Рис. 1. Угол между лучами обыкновенной и необыкновенной волн основного излучения в зависимости от длины волны для кристаллов с синхронизмом в плоскостях: а) XY (кристалл оптимизирован для 1070 нм (\square)); б) XZ (кристаллы оптимизированы для 1081 (\blacktriangle), 1090 (\blacksquare) и 1102 нм (\bullet)); в) YZ (кристалл оптимизирован для 990 нм (\star)).

стоты генерации перестраиваемого ИВЛ во внерезонаторной схеме. Для трех кристаллов длиной 10 мм с синхронизмом в плоскости XZ приводятся результаты измерений полного коэффициента эффективной нелинейности (отношение мощности второй гармоники P_2 к квадрату мощности первой P_1 , P_2/P_1^2) в зависимости от длины волны (рис. 2б).

В пятом и шестом параграфах рассматривается генерация второй гармоники перестраиваемого ИВЛ в кристаллах КТР с синхронизмом в плоскостях XY и YZ . Для этих кристаллов, аналогично плоскости XZ , приведены расчетные значения углов между лучами обыкновенной и необыкновенной волн и углов падения на поверхность кристалла в зависимости от длины волны синхронизма. Кристаллы КТР с синхронизмом в плоскости XY широко распространены в связи с возможностью генерации второй гармоники

на длине волны 532 нм твердотельного Nd:YAG лазера. В случае перестраиваемого ИВЛ данная плоскость подходит для генерации второй гармоники в диапазоне длин волн меньше 540 нм. В работе использовался кристалл с геометрией, позволяющей компенсировать разбегание лучей обыкновенной и необыкновенной волн основного излучения при наклонном падении на поверхность кристалла на длине волны 1070 нм (рис. 1а). При этом для кристалла со скалярным синхронизмом при нормальном падении на этой же длине волны разбегание лучей составляет 2,7 мрад, то есть наклонное падение дает не такой большой выигрыш в компенсации разбегания лучей, как в плоскости XZ . Тем не менее в работе [9] для длины волны 1064 нм компенсация разбегания лучей за счет наклонного падения позволила на 20% увеличить эффективность преобразования по сравнению с нормальным падением.

Плоскость YZ отличается от двух других тем, что в ней возможна генерация второй гармоники во всем диапазоне длин волн стандартного ИВЛ. На рис. 1в показана зависимость угла разбегания лучей для выбранной геометрии кристалла. Видно, что компенсация разбегания лучей для данной геометрии осуществляется вблизи 1000 нм, что лежит за пределами спектра генерации стандартного ИВЛ. Обоснованность выбора данной геометрии заключается в следующем: полная компенсация разбегания лучей для плоскости YZ возможна в диапазоне 1000–1053 нм, но для $\lambda = 1053$ нм она достигается только при скользющем падении луча. Поэтому геометрия кристалла была выбрана такой, чтобы, во-первых, частично компенсировать снос в диапазоне генерации ИВЛ, во-вторых, углы падения не были слишком большими. Значительные углы падения на поверхность кристалла существенно влияют на коэффициент пропускания поверхности.

Также в главе представлены коэффициенты преобразования во вторую гармонику в зависимости от длины волны. На рис. 2 показано, как изменяется экспериментально измеренный полный коэффициент эффективной нелинейности от длины волны основного излучения для кристаллов КТР с синхронизмом в трех различных плоскостях. Как отмечалось выше, кристаллы с синхронизмом в плоскости XZ имели длину 10 мм. Длина кристаллов с синхронизмом в плоскостях XU и YZ составляла 8 мм.

Выводы по ГВГ перестраиваемого ИВЛ во внерезонаторной схеме приводятся в конце главы. Для оптимизации эффективности ГВГ рассчитаны геометрии кристаллов с компенсацией разбегания лучей обыкновенной и необыкновенной волн основного излучения на различных длинах волн. Изучены их перестроечные характеристики. При удвоении частоты во внерезонаторной схеме для плоскостей XZ и XU получены диапазоны перестроек 540–560 нм и 528–540 нм соответственно. В этих двух плоскостях диапазоны перестройки ограничены длиной волны 540 нм, где выполняется не критический коллинеарный синхронизм для кристалла КТР. Полный коэффициент эффективной

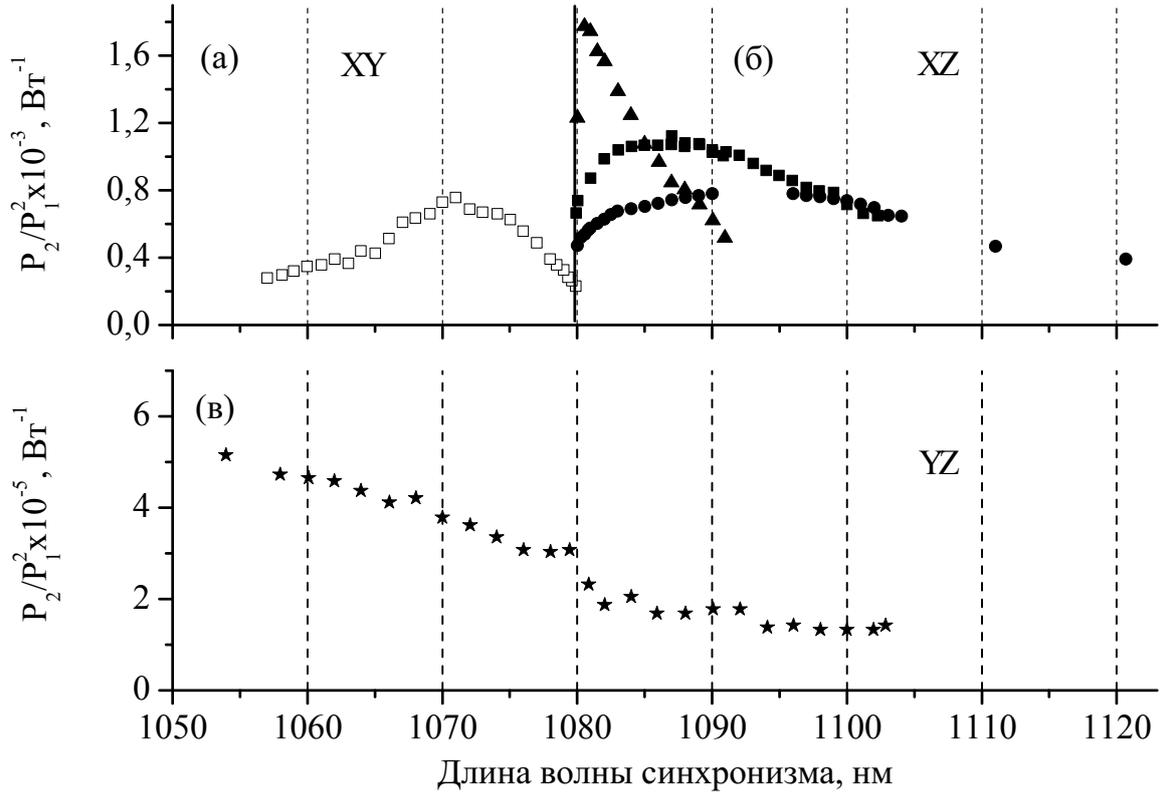


Рис. 2. Полный коэффициент эффективной нелинейности в зависимости от длины волны для кристаллов с синхронизмом в плоскостях: а) XY (кристалл оптимизирован для 1070 нм (\square)); б) XZ (кристаллы оптимизированы для 1081 (\blacktriangle), 1090 (\blacksquare) и 1102 нм (\bullet)); в) YZ (кристалл оптимизирован для 990 нм (\star)).

нелинейности в случае достаточно широкого диапазона перестройки составил $\sim 5 \times 10^{-4} \text{ Вт}^{-1}$. При этом оптимальный коэффициент для не критического коллинеарного синхронизма кристалла КТР длиной 10 мм, который выполняется на длине волны 540 нм, составляет $2 \times 10^{-3} \text{ Вт}^{-1}$ [10]. Для плоскости YZ полный коэффициент эффективной нелинейности оказался на порядок ниже $\sim 4 \times 10^{-5} \text{ Вт}^{-1}$. Диапазон перестройки, который составил 24 нм (527–551 нм), ограничен механическими возможностями ВБР и может быть расширен на весь диапазон генерации стандартного ИВЛ.

В третьей главе описано внутрирезонаторное удвоение частоты генерации перестраиваемого ИВЛ. Глава состоит из двух параграфов. В седьмом параграфе рассматриваются особенности оптической схемы резонатора для внутрирезонаторной генерации второй гармоники, позволяющие возвращать обратно в резонатор параллельные лучи основного излучения, сформированные на выходе кристалла из-за эффекта сноса. Далее приводится сравнение

экспериментальных данных по удвоению частоты генерации ИВЛ во внерезонаторной и внутррезонаторной схемах. Обсуждается влияние уширения спектра генерации ИВЛ на эффективность преобразования при внутррезонаторном удвоении частоты, которое приводит к увеличению пропускания ВБР и снижению добротности резонатора.

В восьмом параграфе описываются фазовые эффекты, оказывающие влияние на эффективность ГВГ при внутррезонаторном удвоении частоты. При перестройке частоты ИВЛ мощность второй гармоники изменяется неплавным образом в отличие от ГВГ во внерезонаторной схеме (рис. 3а). Причина появления данных эффектов связана с наличием внутри резонатора оптических элементов со значительной дисперсией, в которых происходит сдвиг фазы между второй гармоникой и основным излучением. Фазовые эффекты также описывались ранее в других схемах ГВГ [11,12]. С целью качественного описания фазовых эффектов в резонаторе волоконного лазера рассмотрена схема ГВГ в двух последовательных кристаллах, между которыми расположен фазосдвигающий элемент. Для такой схемы приведено решение системы укороченных уравнений для ГВГ в случае цилиндрически симметричного гауссова пучка при рассмотрении не критического синхронизма первого типа. В этом случае мощность второй гармоники пропорциональна следующему интегралу:

$$P_2 \propto \left| \int_0^l \left[\frac{e^{i\Delta kz'}}{1 - i2\frac{z' - z_0}{b}} dz' + e^{i\Phi + i\Delta kl} \frac{e^{i\Delta kz'}}{1 - i2\frac{z' - (l - z_0)}{b}} \right] dz' \right|^2,$$

где l — длина кристалла, Δk — волновая отстройка, z_0 — положение перетяжки пучка в кристалле, b — конфокальный параметр. В случае плоских волн (когда конфокальный параметр $b \rightarrow \infty$) данный интеграл сводится к

$$P_2 \propto 4 \cos^2 \left(\frac{\Phi + \Delta kl}{2} \right) \left(\frac{\sin(\Delta kl/2)}{\Delta kl/2} \right)^2.$$

Такое же выражение (с точностью до обозначений) получено в работах [11,12]. Таким образом, варьируя фазу Φ , можно добиться максимальной мощности второй гармоники. Далее описан метод компенсации фазы, который позволяет получить плавную зависимость мощности второй гармоники от длины волны (рис. 3б) за счет внесения внутрь резонатора дополнительного дисперсионного элемента.

В конце главы приводятся выводы по перестройке частоты ИВЛ с внутррезонаторной ГВГ. Выявлено, что основным фактором, влияющим на снижение добротности резонатора, является уширение спектра генерации волоконного лазера. При перестройке частоты генерации ИВЛ с генерацией второй гармоники во внутррезонаторной схеме проявляются фазовые эффекты,

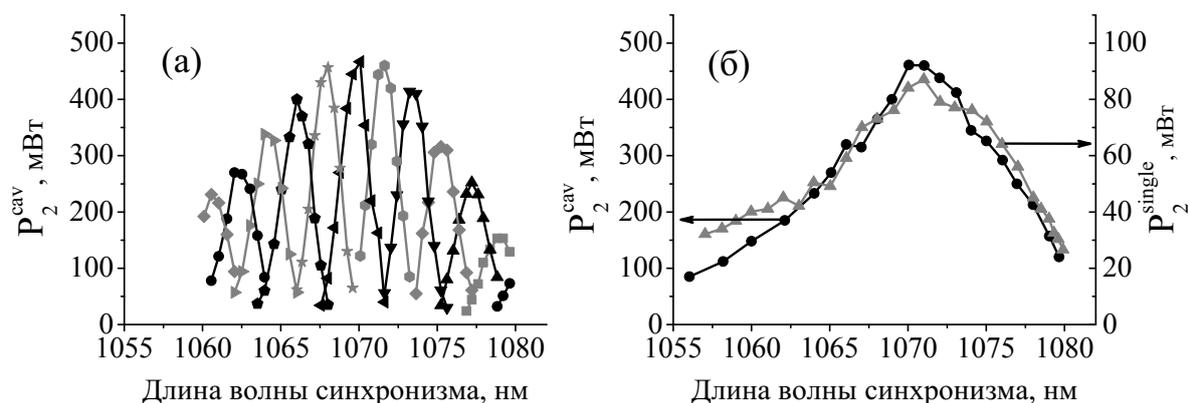


Рис. 3. Мощность второй гармоники в зависимости от длины волны для кристалла с синхронизмом в плоскости XU при ГВГ во внутрирезонаторной схеме P_2^{cav} без компенсации фазы (а) и с компенсацией фазы (б). P_2^{single} — мощность второй гармоники при ГВГ во внерезонаторной схеме.

влияющие на выходную мощность видимого излучения. Внесением дополнительного дисперсионного элемента внутрь резонатора удастся скомпенсировать дисперсию и получить плавную перестройку, схожую с генерацией второй гармоники во внерезонаторной схеме. Получены диапазоны перестройки 528–540 нм и 540–550 нм для кристаллов с синхронизмом в плоскостях XU и XZ соответственно.

При внутрирезонаторном удвоении частоты в кристалле с синхронизмом в плоскости XU удалось увеличить мощность второй гармоники в пять раз по сравнению с внерезонаторной схемой (с 90 до 450 мВт). Для кристалла с синхронизмом в плоскости XZ мощность увеличилась в три раза (с 120 до 350 мВт). Отличие в коэффициенте увеличения связано с большим уширением спектра генерации ИВЛ во втором случае, поскольку использовавшееся активное волокно было длиннее, чем в первом случае, соответственно нелинейные эффекты сильнее сказывались на уширении спектра генерации ИВЛ.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Основные результаты

1. Показано, что кристалл КТР со вторым типом синхронизма, оптимизированный на определенную длину волны с компенсацией сноса за счет наклонного падения на поверхность кристалла, может быть использован для эффективной генерации второй гармоники непрерывного слу-

чайно поляризованного излучения иттербиевого волоконного лазера с перестройкой длины волны в диапазоне больше 40 нм.

2. Продемонстрирован диапазон плавной перестройки частоты второй гармоники 528–540 нм и 540–560 нм для кристаллов с синхронизмом в плоскостях XU и XZ соответственно. Полный коэффициент эффективной нелинейности (отношение мощности второй гармоники к квадрату мощности первой) во внрезонаторной схеме составил $\sim 5 \times 10^{-4} \text{ Вт}^{-1}$. Для кристалла с синхронизмом в плоскости YZ получен диапазон перестройки 527–551 нм, который ограничен механическими возможностями перестраиваемой волоконной брэгговской решетки. Полный коэффициент эффективной нелинейности в плоскости YZ на порядок ниже, чем в плоскостях XU и XZ .
3. Показано увеличение эффективности генерации второй гармоники иттербиевого волоконного лазера во внутррезонаторной схеме до пяти раз по сравнению с внрезонаторной схемой. Установлено, что уширение спектра с ростом мощности лазера приводит к увеличению эффективного пропускания волоконной брэгговской решетки. В результате снижается добротность резонатора, и ограничивается рост мощности основного излучения внутри резонатора.
4. Добавление внутрь резонатора дисперсионного элемента, компенсирующего сдвиг фазы волн второй гармоники, генерируемых на прямом и обратном проходе через нелинейный кристалл, позволяет достичь плавного изменения мощности второй гармоники при перестройке частоты иттербиевого волоконного лазера с внутррезонаторным удвоением частоты.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

- [A1] Akulov V. A., Afanasiev D. M., Babin S. A., Churkin D. V., Kablukov S. I., Rybakov M. A., Vlasov A. A. Frequency tuning and doubling in Yb-doped fiber lasers // *Laser Phys.* — 2007. — Vol. 17, no. 2. — P. 124–129.
- [A2] Akulov V. A., Babin S. A., Kablukov S. I., Vlasov A. A. Fiber lasers with a tunable green output // *Laser Phys.* — 2008. — Vol. 18, no. 11. — P. 1225–1229.
- [A3] Akulov V. A., Babin S. A., Kablukov S. I., Raspopin K. S. Intracavity

frequency doubling of Yb-doped fiber laser with 540–550 nm tuning // *Laser Phys.* — 2011. — Vol. 21, no. 5. — P. 935–939.

- [A4] Акулов В. А., Каблуков С. И., Бабин С. А. Удвоение частоты излучения перестраиваемого иттербиевого волоконного лазера в кристаллах КТР с синхронизмом в плоскостях XY и YZ // *Квант. электроника.* — 2012. — Т. 42, № 2. — С. 120–124.
- [A5] Akulov V. A., Afanasiev D. M., Babin S. A., Churkin D. V., Kablukov S. I., Rybakov M. A., Vlasov A. A. Tunable green Yb-doped fiber laser // *Proc. ASSP 2007*, 28–31 January 2007, Vancouver, Canada. — Paper MB22, P. 1–3.
- [A6] Akulov V. A., Babin S. A., Churkin D. V., Ismagulov A. E., Kablukov S. I., Lobach I. A., Nikulin M. A., Shelemba I. S., Vlasov A. A. New operation modes of high-power Yb-doped fiber lasers // *Proc. ICMAR XIII*, 5–10 February 2007, Novosibirsk, Russia, part II. — P. 13–18.
- [A7] Akulov V. A., Babin S. A., Churkin D. V., Kablukov S. I., Vlasov A. A. Powerful green Yb-doped fiber laser // *Proc. SPIE 2007*. Vol. 6731, International Conference on Lasers, Applications, and Technologies LAT 2007: Advanced Lasers and Systems. Eds.: Valentin A. Orlovich, Vladislav Panchenko, Ivan A. Scherbakov. — P. 67310L (6 pages).
- [A8] Акулов В. А., Бабин С. А., Власов А. А., Каблуков С. И., Чуркин Д. В. Внутррезонаторное удвоение частоты перестраиваемого иттербиевого лазера // *Материалы российского семинара по волоконным лазерам 2007.* — Новосибирск, 2007. — С. 50–51.
- [A9] Akulov V. A., Babin S. A., Kablukov S. I., Raspopin K. S. Intracavity frequency doubling of Yb-doped fiber laser with 540–550 nm tuning // *19th International Laser Physics Workshop - LPHYS'10.* — Technical Digest. — Foz do Iguaçu, Brazil, 2010. — P. 461.
- [A10] Акулов В. А., Каблуков С. И., Бабин С. А. Удвоение частоты перестраиваемого иттербиевого волоконного лазера в различных плоскостях кристалла КТР // *Материалы российского семинара по волоконным лазерам 2012.* — Новосибирск, 2012. — С. 163–164.

Список цитируемых работ

- [1] Курков А. С., Дианов Е. М. Непрерывные волоконные лазеры средней мощности // *Квант. электроника.* — 2004. — Т. 34, № 10. — С. 881–900.

- [2] Hanna D. C., Percival R. M., Perry I. R. et al. An ytterbium-doped monomode fiber laser: Broadly tunable operation from 1010 nm to 1162 nm and three-level operation at 974 nm // *Journal of Modern Optics*. — 1990. — Vol. 37, no. 4. — P. 517–525.
- [3] Kurkov A. S. Oscillation spectral range of Yb-doped fiber lasers // *Las. Phys. Lett.* — 2007. — Vol. 4, no. 2. — P. 93–102.
- [4] Kashyap R., *Fiber Bragg gratings*. — Academic Press, 1999.
- [5] Thompson R., Tu M., Aveline D. et al. High power single frequency 780 nm laser source generated from frequency doubling of a seeded fiber amplifier in a cascade of PPLN crystals // *Opt. Exp.* — 2003. — Vol. 11, no. 14. — P. 1709–1713.
- [6] Markert F., Scheid M., Kolbe D., Walz J. 4W continuous-wave narrow-linewidth tunable solid-state laser source at 546 nm by externally frequency doubling a ytterbium-doped single-mode fiber laser system // *Opt. Exp.* — 2007. — Vol. 15, no. 22. — P. 14476–14481.
- [7] Feng Y., Huang S., Shirakawa A., Ueda K.-I. Multiple-color cw visible lasers by frequency sum-mixing in a cascading Raman fiber laser // *Opt. Exp.* — 2004. — Vol. 12, no. 9. — P. 1843–1847.
- [8] Feng Y., Huang S., Shirakawa A., Ueda K.-I. 589 nm light source based on Raman fiber laser // *Jpn. J. Appl. Phys.* — 2004. — Vol. 43, no. 6A. — P. L722–L724.
- [9] Asaumi K. Fundamental Walkoff-Compensated Type II Second-Harmonic Generation in KTiOPO_4 and LiB_3O_5 // *App. Opt.* — 1998. — Vol. 37, no. 3. — P. 555–560.
- [10] Ou Z. Y., Pereira S. F., Polzik E. S., Kimble H. J. 85% efficiency for cw frequency doubling from 1.08 to 0.54 μm // *Opt. Lett.* — 1992. — Vol. 17, no. 9. — P. 640–642.
- [11] Gonzalez D., Nieh S., Steier W. Two-pass-internal second-harmonic generation using a prism coupler // *IEEE Journal of Quant. Electron.* — 1973. — Vol. 9, no. 1. — P. 23 – 26.
- [12] Алферов Г. Н., Бабин С. А., Драчев В. П. Нелинейная дисперсионная интерферометрия плазмы аргонового лазера // *Оптика и спектроскопия*. — 1987. — Т. 63, № 3. — С. 594–599.