05

Непрерывный перестраиваемый гольмиевый лазер с внутрирезонаторным оптическим фильтром на основе конического PM волокна

© А.В. Ширманкин, А.И. Лобанов, В.А. Камынин, В.Б. Цветков

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
Москва, Россия

e-mail: andreishirmankin@kapella.gpi.ru

Поступила в редакцию 23.04.2026 г.
В окончательной редакции 02.06.2026 г.
Принята к публикации 29.06.2026 г.

В работе представлен непрерывный перестраиваемый гольмиевый волоконный лазер с внутрирезонаторным оптическим фильтром на основе конического волокна с сохранением поляризации. Фильтр изготовлен методом „нагрева и вытяжки“ из коммерческого волокна с сохранением поляризации и имеет диаметр перетяжки 20 μm при длине 40 mm. Управление длиной волны генерации осуществляется механическим изгибом конического оптического волокна, что является надежным методом настройки, исключающим риск разрыва волокна. Экспериментально подтверждено, что после процесса вытяжки коническое волокно сохраняет свои двулучепреломляющие свойства: степень поляризации излучения на выходе составила 0.88–0.91. Спектральный отклик фильтра имеет синусоидальную форму с глубиной модуляции до 9.9 dB и областью свободной дисперсии (FSR) около 1.6 THz. Продемонстрирована перестройка центральной длины волны лазера в диапазоне от 2015 до 2087 nm. Показано, что изменение длины волны происходит как плавно, так и дискретно (путем переключения между максимумами пропускания фильтра) в зависимости от угла изгиба и баланса между усилением и потерями в резонаторе. Полученные результаты могут найти применение в спектроскопии, создании прецизионных сенсоров и биомедицинских технологиях.

Ключевые слова: гольмиевый волоконный лазер, перестройка длины волны, коническое волокно, волокно с сохранением поляризации, оптический фильтр.

DOI: 10.61011/OS.2026.09.63816.9256-26

1. Введение

На данный момент волоконные лазеры широко представлены во многих областях науки и технологии. Широкие спектры усиления, а также большая номенклатура элементов позволяют реализовать различные режимы работы. Особого внимания заслуживают волоконные лазеры, способные гибко переключаться между несколькими длинами волн или осуществлять плавную перестройку. Это обусловлено прямыми потребностями целого ряда технологических областей, таких как спектроскопия [1], разработка прецизионных сенсоров [2,3], высокоскоростные системы оптической связи [4].

Значительное внимание в последнее время уделяется также лазерам двухмикроконного спектрального диапазона. Реализация генерации в данной части спектра может быть достигнута в лазерах, использующих оптические волокна, легированные ионами гольмия в качестве активной среды. Данные лазеры активно применяются в ЛИДАРах для зондирования атмосферы [5,6], обнаружения газа [7], а также в биомедицинских технологиях [8,9], где с помощью регулировки длины волны можно контролировать глубину проникновения излучения в биологические ткани.

Для достижения перестройки длины волны генерации в лазерах используются разнообразные подходы. Среди них интерферометр Маха-Цандера [10], полосовой фильтр [11], внедрение в резонатор волоконных брэгговских решеток [12], нелинейные эффекты — такие как четвертьволновое смешение [13] и нелинейное вращение плоскости поляризации [14], а также использование конусного оптического волокна (КОВ) [15].

Интерес исследователей к оптическим фильтрам на базе КОВ возрос благодаря совершенствованию методов вытяжки [16]. Данные устройства создаются путем нагрева и растяжения волокна до формирования участка с постоянным диаметром, называемого перетяжкой, ограниченного двумя конусными областями с изменяющимся диаметром волокна. Регулировка длины волны в лазерах с оптическими фильтрами на основе КОВ осуществляется через его растяжение [17,18], скручивание [19] или изгиб [20]. Метод изгиба [15,18,21] может быть наиболее предпочтительным и надежным, так как он исключает риск разрыва, характерный для механического натяжения [17]. А метод скручивания недостаточно изучен и встречается в литературе лишь в одном источнике [19], поэтому нельзя говорить о его надежности.

На данный момент перестройка длины волны в волоконных лазерах с помощью КОВ представлена только в

системах на основе стандартного (с областью свободной дисперсии — SMF) волокна. В свою очередь КОВ востребованы в лазерных системах не только на основе стандартных SMF-волокон, но и на основе волокон с сохранением поляризации (PM). Как известно, полностью волоконные системы на основе PM-волокон более надежны и стабильны, что очень важно для вышеописанных применений. Стремление объединить преимущества PM-волокон и КОВ в качестве оптического фильтра представлено в единственной работе [19], в которой авторы демонстрируют возможность перестройки длины волны с помощью КОВ, изготовленных из PM-волокна методом скручивания.

В настоящей работе демонстрируется использование PM-КОВ с диаметром перетяжки 20 μm и длиной 40 mm, реализованного в качестве спектрального фильтра в перестраиваемом гольмиевом волоконном лазере. Настройка длины волны лазера осуществляется методом изгиба КОВ. Насколько нам известно, такая схема ранее не использовалась в качестве механизма селекции длины волны в системах с сохранением поляризации. Продемонстрирована перестройка длины волны волоконного PM-лазера до 34 nm, а также возможность генерации лазера в трехдлинноволновом режиме.

2. Оптический фильтр на основе конических PM-волокон

2.1. Изготовление конусного PM-волокона

КОВ изготавливались на установке Vytran GPX 3400 методом „нагрева и вытяжки“ из коммерческого доступного волокна PM1550-XP (сердцевина 8.5 μm, оболочка 125 μm). Процесс включал механическую очистку волокна от полимера, очистку зачищенного участка изопропиловым спиртом и фиксацию в манипуляторах станции Vytran GPX 3400. Формирование КОВ заданных размеров (длиной 40 mm и диаметром 20 μm) осуществлялось путем программно-контролируемого нагрева графитовой нитью Ω-образной формы с одновременным растяжением волокна. Геометрический профиль КОВ представлен на рис. 1.

2.2. Проверка поляризационных свойств конических PM-волокон

Косвенным подтверждением того, сохранил ли КОВ поляризационные свойства волокон, из которых он был вытянут, может послужить сравнение эллиптичности поляризации излучения входящего в КОВ и прошедшего через него. Для этого эксперимента был создан волоконный гольмиевый лазер на основе волокон с сохранением поляризации. На рис. 2 представлена схема измерения поляризационных свойств гольмиевого волоконного лазера.



Рис. 1. Профиль КОВ, используемого в эксперименте.

В качестве активной среды использовался 1 m волокна IXF-HDF-PM-8-125 компании iXBlue, легированного ионами Ho^{3+}. Поглощение на 1150 nm составляло 22.3 dB/m. Накачка производилась непрерывным иттербиевым волоконным лазером, работающим на длине волны 1130 nm. Для ввода накачки в резонатор использовался мультиплексор (WDM) с выделенной осью 1150/2100 с потерями на длине волны 2100 nm 0.35 dB. Для вывода непоглощенной накачки использовался аналогичный WDM. Также схема включала в себя изолятор с блокировкой быстрой оси с потерями на рабочей длине волны 1.18 dB. Для вывода излучения из резонатора использовался разветвитель X-типа с коэффициентом деления 90/10 с потерями на 90% 1.01dB, 10.89dB на 10%.

На рис. 3, *a, b* представлены спектр выходного излучения лазера и зависимость средней мощности в точке *2* от угла поворота призмы Глана. Средняя выходная мощность в точке *1* 19.3 mW.

Полученная зависимость была аппроксимирована функцией $\cos^2(\varphi)$. Максимум пропускания, полученный по аппроксимации, составляет 0.59 ± 0.02 в единицах, нормированных на значение мощности в точке *1*. Минимум составил 0.04–0.02 в аналогичных единицах. Степень поляризации излучения определялась по формуле

$$P = (I_{\max} - I_{\min})/(I_{\max} + I_{\min}), \qquad (1)$$

где $I_{\max}$ и $I_{\min}$ — максимальная и минимальная интенсивности света, наблюдаемые при вращении поляризатора (призмы Глана).

Для излучения лазера степень поляризации равняется 0.88 ± 0.04. Аналогичным образом были произведены измерения с КОВ по схеме, приведенной на рис. 4.

На рис. 5 *a, b* представлены зависимости мощности в точке *2* от угла поворота призмы Глана для двух углов изгиба КОВ 0° и 90°. Средняя выходная мощность в точке *1* 4.4 mW в положении КОВ 0° и 3.6 mW в положении КОВ 90°.

Для КОВ в положении 0° максимум пропускания составляет 0.57 ± 0.02, минимум — 0.03–0.02. Степень поляризации излучения в этом случае 0.91 ± 0.03. В свою очередь для КОВ в положении 90° максимум пропускания составляет 0.65 ± 0.02, минимум — 0.04 ± 0.02, степень поляризации 0.88 ± 0.04. Сравнивая результаты измерений в схеме без КОВ и в схеме с КОВ в положении 0°, можно отметить следующие особенности. Во-первых, КОВ вносит потери порядка 6.4 dB. Во-вторых, разность в максимальном и минимальном пропускании незначительна и находится в пределах

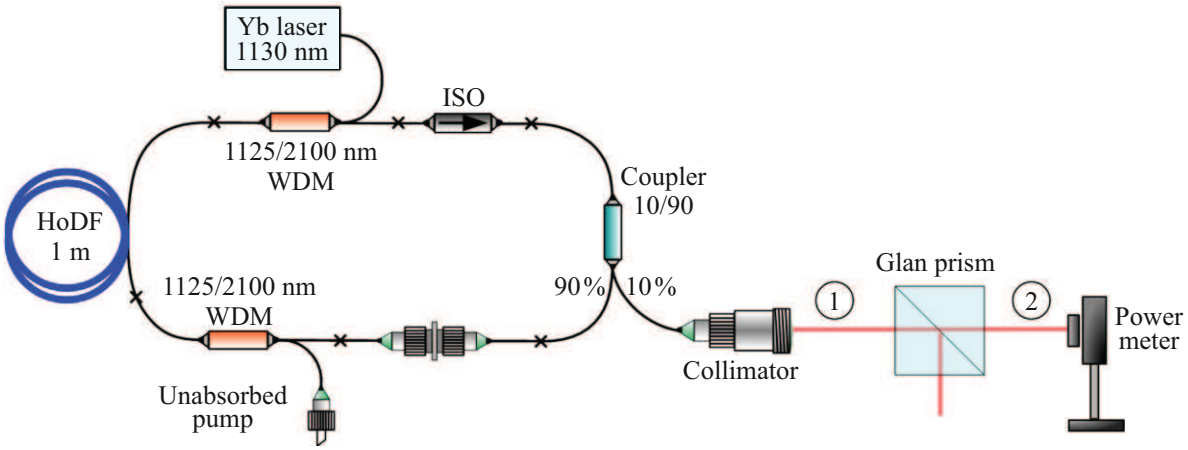


Рис. 2. Схема измерения поляризационных свойств гольмиевого волоконного лазера.

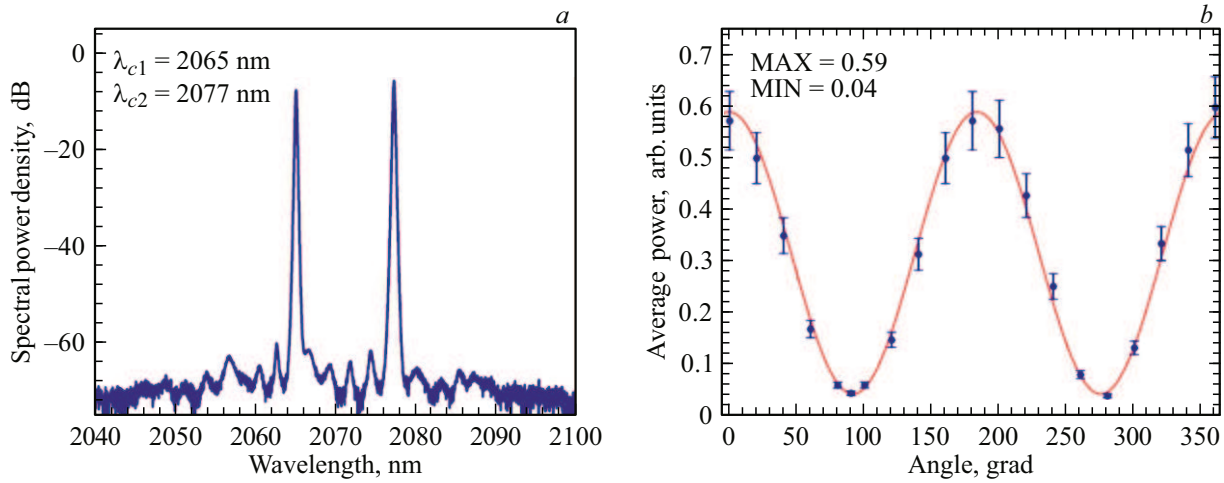


Рис. 3. (*a*) Спектр оптического излучения гольмиевого волоконного лазера; (*b*) зависимость средней мощности в точке *2* от угла поворота призмы Глана. График нормирован на среднюю мощность в положении *1*.

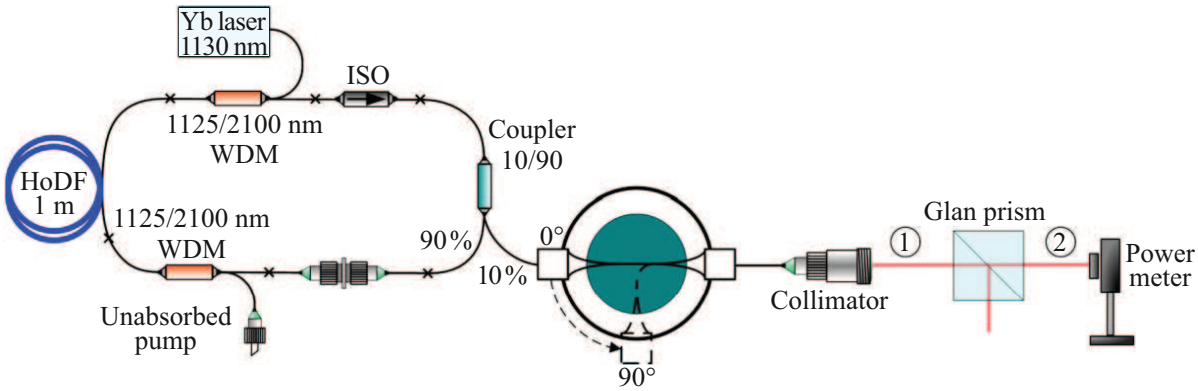


Рис. 4. Схема экспериментальной установки для измерения эллиптичности поляризации излучения, прошедшего через КОВ.

погрешности. Этот факт говорит о том, что КОВ в выпрямленном состоянии не вносит значительных искажений в поляризационную структуру поля проходящего через него излучения. Следовательно, после модификации волокно сохранило свои двулучепреломляющие свойства.

Иные результаты получены при угле изгиба КОВ 90°. Потери, вносимые КОВ в этом случае, увеличились до

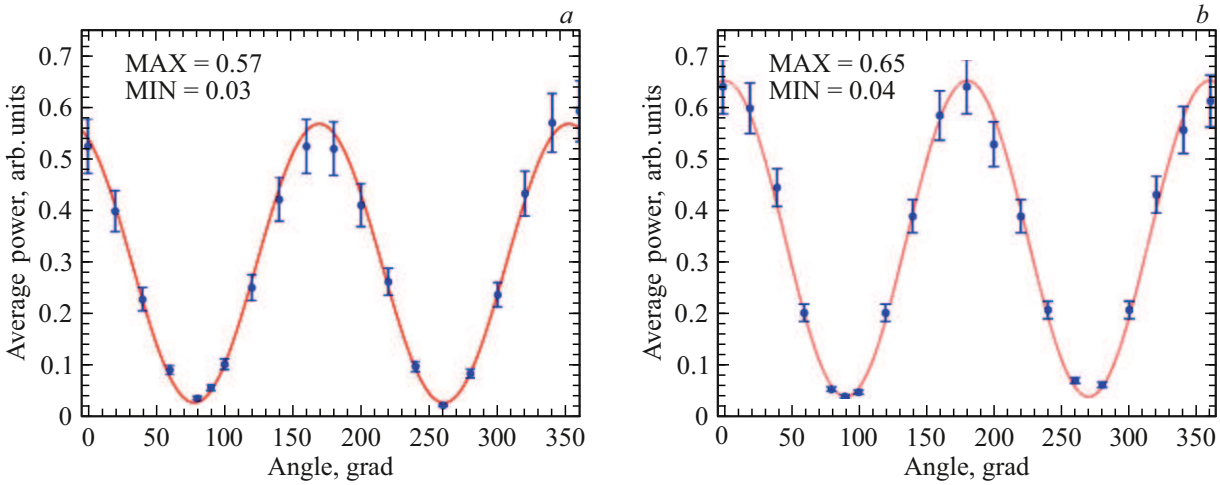


Рис. 5. (*a*) Зависимость мощности излучения после призмы Глана от её углового положения для положения КОВ 0°; (*b*) зависимость мощности излучения после призмы Глана от её углового положения для положения КОВ 90°. Оба графика нормированы на соответствующую среднюю мощность в положении КОВ 90°.

7.3 dB, что позволяет охарактеризовать полные изгибные потери в этом положении, равные ~ 0.9 dB. Это значение включает в себя как потери, связанные с „утечкой" моды из волокна, так и потери, связанные с отстройкой фильтра по длине волны. Как видно из рис. 5, *b*, для КОВ при угле изгиба 90° характерно увеличение максимума пропускания на ~ 0.06. При этом значение степени поляризации находится в рамках погрешности. Различие интенсивностей при разных углах изгиба объясняется динамикой перекрытия мод. Изначально на входе в конусную область возбуждаются две моды. В процессе сужения волокна до диаметра перетяжки происходит преобразование полей, и в области перетяжки формируется сложная суперпозиция основной моды LP_{01} и мод высших порядков (прежде всего LP_{02}). Интенсивность на выходе из КОВ определяется степенью перекрытия полей этих мод: в зависимости от фазовых набегов интерференция между LP_{01} и LP_{02} может быть как конструктивной, так и деструктивной.

При малых углах изгиба вклад в интерференцию вносит преимущественно пара мод $LP_{01}-LP_{02}$. Однако при увеличении угла изгиба до 90° распределение поля деформируется сильнее, что приводит к возбуждению дополнительных мод еще более высоких порядков. Увеличение общего числа участвующих в интерференции мод и изменение их коэффициентов перекрытия при изгибе приводят к перераспределению энергии в спектре, что и проявляется как изменение максимума пропускания. Дополнительный вклад в изменение потерь также вносит поляризация: при изгибе происходит частичное вращение плоскости поляризации, однако в данном эксперименте этот эффект остается в пределах погрешности, поэтому его можно не учитывать, что подтверждается стабильностью степени поляризации.

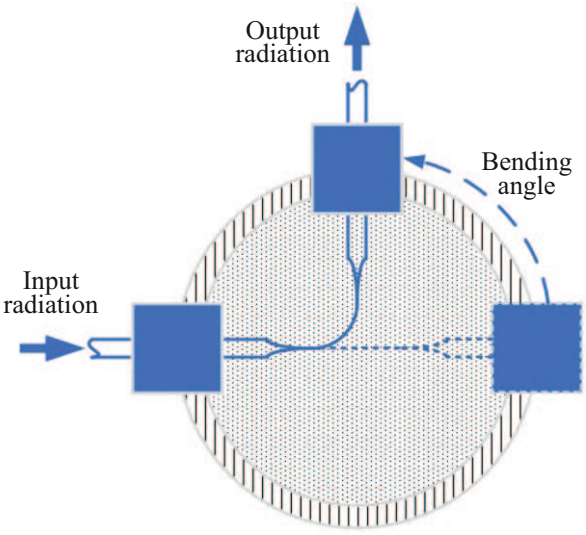


Рис. 6. Принципиальная схема оптического фильтра на основе КОВ.

2.3. Оптический фильтр на основе конусного PM-волокна

На основе КОВ был сконструирован оптический фильтр. Фильтр состоит из КОВ, закрепленного в двух специальных держателях, один из которых можно свободно поворачивать для регулировки угла изгиба КОВ. Рис. 6 иллюстрирует принципиальную схему оптического фильтра на основе КОВ.

Спектральный отклик изготовленных КОВ был измерен в оптическом диапазоне от 1950 до 2100 nm с использованием гольмиевого волоконного источника усиленного спонтанного излучения (ASE). Рис. 7 демонстрирует схему источника.

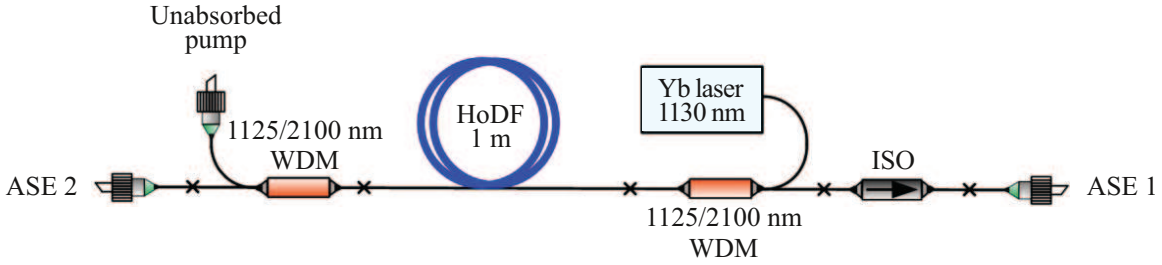


Рис. 7. Схема источников ASE.

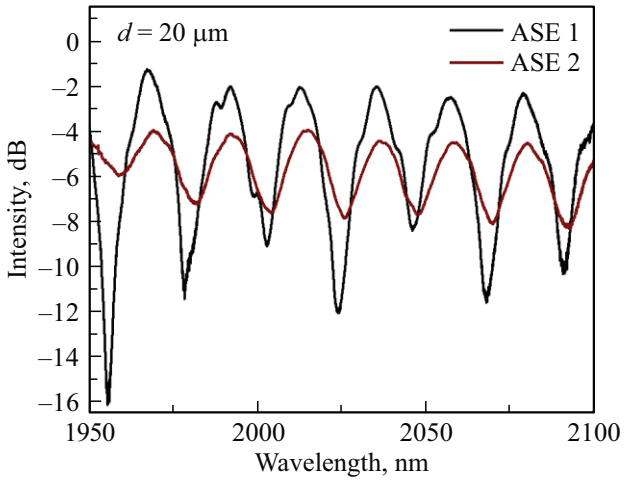


Рис. 8. Спектральный отклик КОВ с диаметром перетяжки 20 μm для двух источников ASE.

Ввиду свойств изолятора собранная схема позволяет получить два источника ASE: с линейной (ASE 1) и случайной (ASE 2) поляризациями.

Спектры пропускания КОВ при его различных углах изгиба регистрировались с помощью спектроанализатора YOKOGAWA AQ6375B с разрешением 0.2 nm. Форма спектра КОВ имеет синусоидальную форму (рис. 8), которая возникает из-за интерференции между основной модой и модами более высокого порядка, возникающей в результате распространения излучения через различные области КОВ, такие как „первый конус-перетяжка-второй конус".

В случае использования ASE 1 в качестве источника глубина модуляции КОВ составила 9.9 dB. Вносимые потери для КОВ были ниже 1.1 dB. Ширина каждого пика на полувысоте составила 21.8 ± 1 nm. Длина FSR составила 1.6 ± 0.2 THz и рассчитывалась как разность между максимальными значениями интенсивности двух соседних пиков. В случае использования ASE 2 в качестве источника глубина модуляции КОВ составила 3.4 dB. Вносимые потери для КОВ были ниже 3.9 dB. Ширина каждого пика на полувысоте составляет 30.5 ± 0.5 nm. Длина FSR составила 1.6 ± 0.1 THz.

Различие в глубинах модуляции связано с сохранившимся в полученных КОВ двулучепреломлением. При прохождении через КОВ эффективней всего модифицируется та часть излучения, направление поляризации которой совпадает с направлением медленной оси, что соответствует ASE 1. В то же время часть излучения с ортогональной поляризацией претерпевает меньшие изменения. Поэтому в случае распространения неполяризованного излучения (ASE 2) периодическая структура в спектре имеет меньшую глубину модуляции нежели в случае поляризованного излучения.

Спектры пропускания оптического фильтра на основе КОВ в зависимости от угла изгиба регистрировались с помощью следующей схемы (рис. 9). Угол изгиба КОВ изменялся от 0° до 90° с шагом 5°.

Рисунок 10 демонстрирует перестройку длины волны гольмиевого ASE: (*a*) линейной и (*b*) со случайной поляризацией. При изгибе КОВ происходит смещение периодической структуры в спектре ASE в более коротковолновую область спектра.

Синусоидальные пики КОВ для ASE с линейной поляризацией смещаются в среднем на 45 nm при угле изгиба 90°. Для случайной поляризации при том же угле изгиба — на 48 nm. Как видно из рис. 8, перестройка периодической структуры в спектре ASE не зависит от состояния поляризации входного излучения, что делает его универсальным фильтром как для поляризованного, так и для неполяризованного излучения.

3. Экспериментальная установка

Схема непрерывного перестраиваемого гольмиевого лазера представлена на рис. 11.

Все элементы, составляющие кольцевой резонатор, аналогичны тем, что описаны в п. 2.2. Ключевым элементом в резонаторе является спектральный фильтр на основе КОВ. Изгиб КОВ осуществлялся моторизированной подвижкой модели MRS102 с минимальным шагом 0.01°. Так как угол изгиба КОВ является косвенной величиной, влияющей на спектральные свойства фильтра, в схему измерения была добавлена камера Basler acA1920-40um для контроля радиуса кривизны КОВ. Измерения спектральных характеристик, получение фотографий КОВ и контроль угла поворота

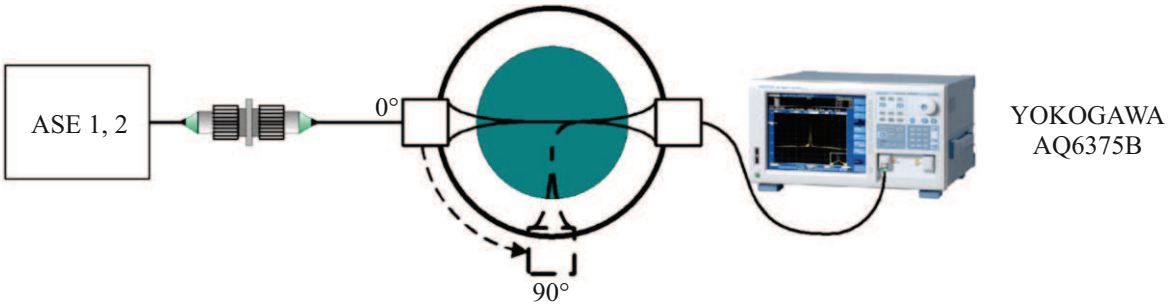


Рис. 9. Схема измерений пропускания КОВ.

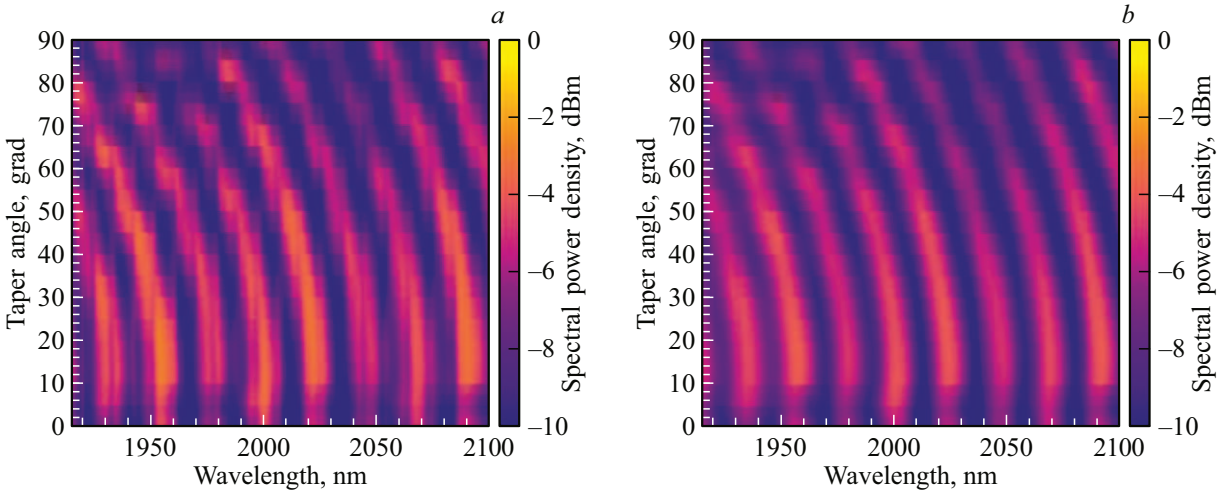


Рис. 10. Спектральные карты перестройки периодической структуры, вносимой КОВ для источников ASE: (*a*) с линейной, (*b*) со случайной поляризацией.

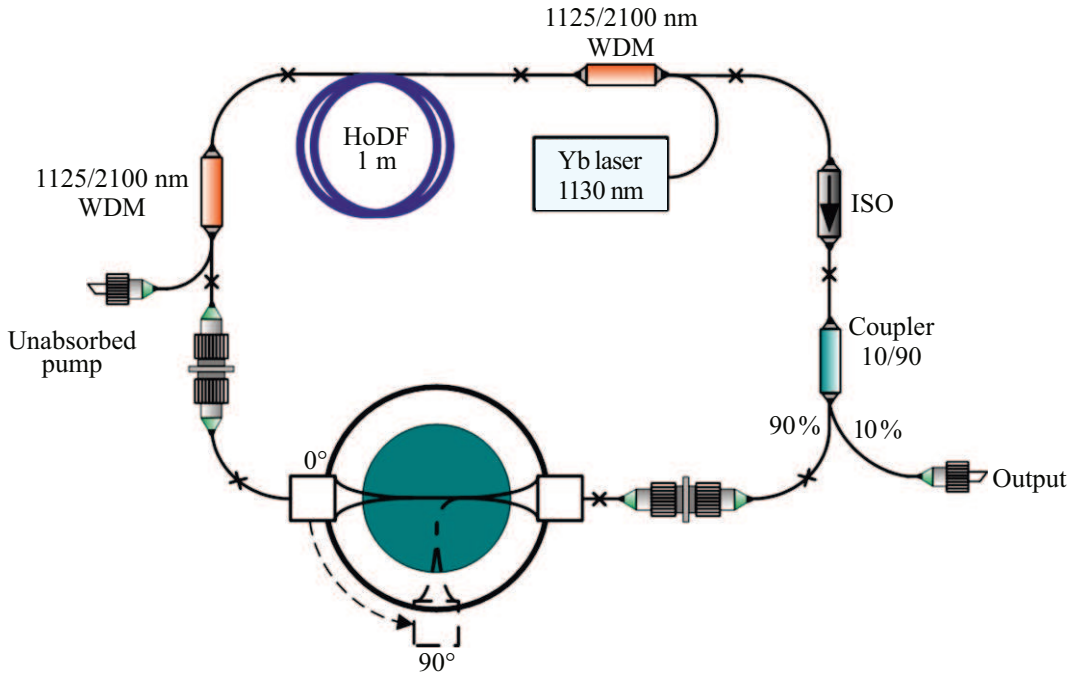


Рис. 11. Схема непрерывного гольмиевого лазера со спектральным фильтром на основе РМ-КОВ.

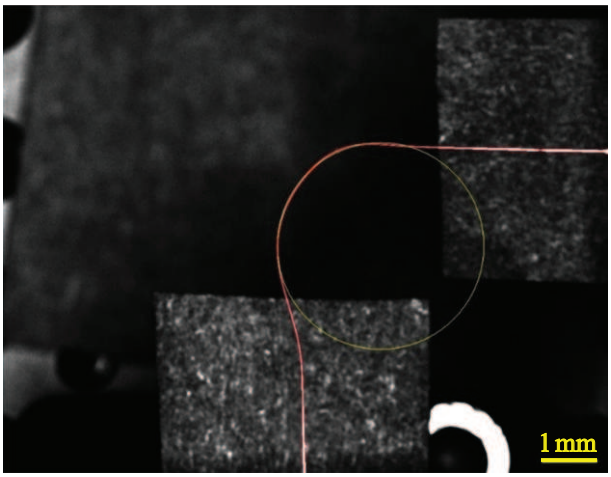


Рис. 12. Фотография КОВ, полученная на камеру. Красной линией выделен контур КОВ, полученный в результате обработки. Желтой линией обозначена аппроксимация окружностью.

КОВ происходили в автоматическом режиме при помощи персонального компьютера. Коэффициент гамма-коррекции изображения составил 4, время экспозиции 5 ms. На рис. 12 представлен пример обработки фотографии КОВ с углом поворота 90°.

Радиус кривизны вычислялся по полученным фотографиям. В первую очередь определялся размер пикселя в μm по размеру перетяжки КОВ на фотографии в выпрямленном состоянии (0°). Далее происходила обработка фотографии для получения нужного размера кадра. В обработанной фотографии по контрасту между яркими и темными пикселями определялся контур КОВ. Для расчетов брался ближайший к центру кривизны контур. Далее производилась аппроксимация контура функцией окружности, из которой вычислялся радиус в пикселях. Полученный радиус кривизны приводился к единицам измерения μm.

4. Результаты и обсуждение

В первую очередь рассмотрим зависимость радиуса кривизны КОВ от угла изгиба (рис. 13).

Минимальное достигнутое значение радиуса кривизны составляет около 20 mm. Очевидно, что кривая носит нелинейный характер: после крутого начального участка, где радиус резко уменьшается (более чем на два порядка) с увеличением угла изгиба КОВ, наблюдается выход на линейный режим, при котором даже значительный рост угла изгиба приводит лишь к несущественному дальнейшему уменьшению радиуса. Данный результат означает, что при последовательном изменение угла изгиба КОВ должна происходить плавная перестройка длины волны лазера.

Результаты сканирования углов изгиба КОВ внутри резонатора гольмиевого лазера представлены на рис. 14. Благодаря использованию выхода 2 разветвителя X-типа можно наблюдать (рис. 14, *a*) и центральную длину волны генерации, и периодическую структуру спектра, вносимую фильтром. На рис. 14, *b* приведена зависимость центральной длины волны излучения от угла изгиба КОВ.

На рис. 14, *b* видно, что переключение центральной длины волны гольмиевого лазера осуществляется в диапазоне от 2015 до 2087 nm в зависимости от угла изгиба. Можно выделить несколько зон угловых положений со схожими характеристиками. В первой зоне (при угле изгиба $< 30°$) наблюдается однодлинноволновая генерация с изменяющейся центральной длиной волны в узком диапазоне длин волн от 2066.8 до 2069.3 nm. В диапазоне угла изгиба от 45° до 90° наблюдается тенденция к последовательной перестройке длины волны от 2049 до 2083 nm. Точки в положениях 60°, 80° и 85° выбиваются из данной зависимости. Также существуют угловые положения (30–40°), которые нельзя отнести к этим двум группам.

Данный результат объясняется тем, что при изгибе КОВ меняется разность фаз между модами, распространяющимися в нем из-за изменения геометрического пути и эффективного показателя преломления. Это приводит к смещению спектральных „провалов“ и „пиков“ пропускания фильтра. Когда происходит изменение угла изгиба, меняется профиль потерь в резонаторе. В системах с широким усилением лазер перестраивается на ту длину волны, где достигается наилучший баланс между усилением активной среды и суммарными потерями. В нашем случае спектр усиления находится в диапазоне от 2049 до 2084 nm с центром на длине волны 2067 nm (рис. 13, *b*). При изгибе КОВ „гребенка“ фильтра смещается. Когда текущая линия генерации испытывает большие потери, генерация на этой длине волны прекращается из-за возросшего уровня потерь в данной области спектра, и происходит переключение на соседний максимум пропускания фильтра. Это объясняет, почему на графике есть как области плавной

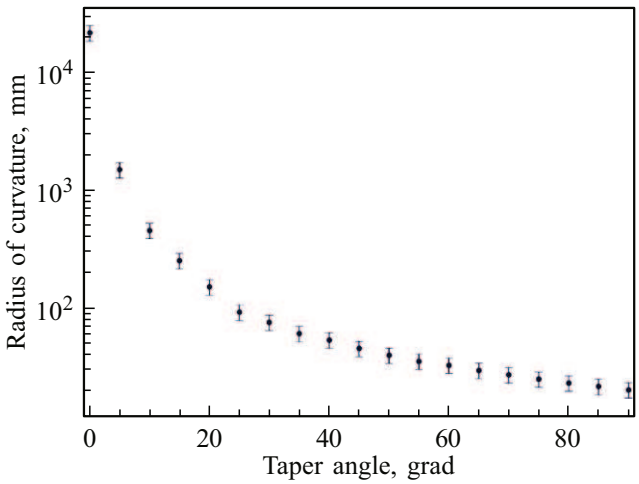


Рис. 13. Зависимость радиуса кривизны КОВ от угла изгиба.

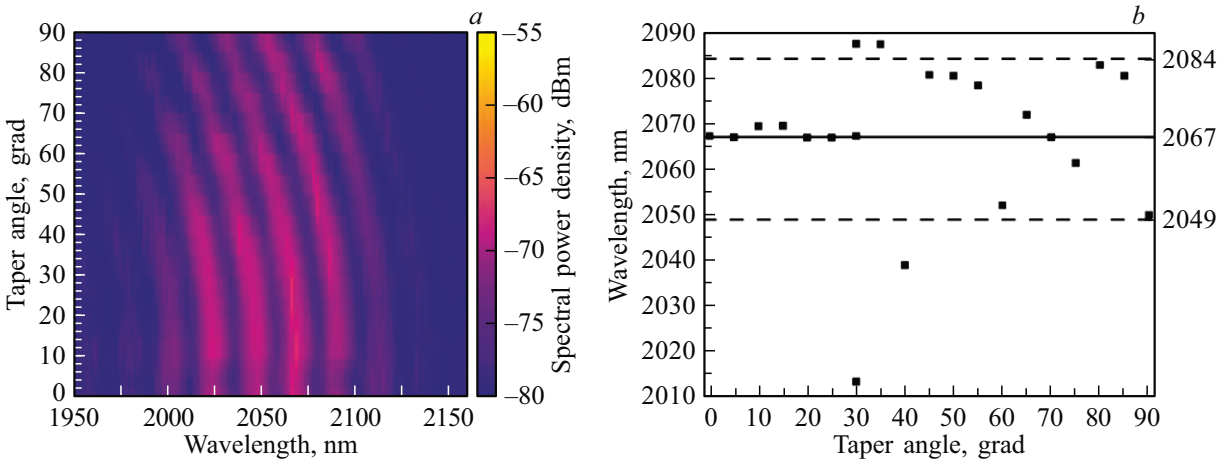


Рис. 14. Перестройка длины волны гольмиевого непрерывного лазера с помощью КОВ.

перестройки, так и резкие перепады. Предположение о переключении длины волны генерации на соседний максимум гребенки подтверждается экспериментальными данными. На рис. 13, *b* происходит переключение центральной длины волны на значения 20 nm, близкие к FSR (1.6−0.1 THz).

В угловом положении 30° наблюдается генерация на трех длинах волн: 2067, 2013 и 2087 nm. Это означает, что в этом случае отношение потерь и усиления позволяет реализовать генерацию сразу на нескольких длинах волн. Причем эти длины волн удалены друг от друга на величину, кратную FSR: более длинноволновая линия генерации (2087 nm) находится на соседнем порядке интерференции (отстроена от центральной длины волны 2067 nm на величину FSR), а более коротковолновая (2013 nm) находится через порядок интерференции (отстроена от центральной длины волны 2067 nm на величину $2 \cdot FSR$).

5. Заключение

В работе был создан и исследован спектральный фильтр, основанный на изгибе КОВ, изготовленных из PM-волокон. Впервые были проверены поляризационные свойства фильтра. Как показывает эксперимент, степень поляризации излучения, прошедшего через КОВ в положении 0° ($P = 0.91 \pm 0.03$) и 90° ($P = 0.88 \pm 0.04$), совпадает по значению со степенью поляризации излучения, генерируемого гольмиевым волоконным лазером без использования КОВ ($P = 0.88 \pm 0.04$). Это говорит о том, что КОВ в процессе своего изготовления не потеряли свойств PM-волокон, из которых они были изготовлены.

Была продемонстрирована перестройка периодической структуры, вносимой КОВ для двух источников ASE: с линейной и случайной поляризациями. Для обоих источников результаты аналогичны: при угле изгиба КОВ $< 30°$ перестройка находится в узком диапазоне до 4 nm, в то время как при увеличении изгиба до положения 90° были достигнуты значения перестройки вплоть до 50 nm. Отличие в использовании двух источников ASE заключается лишь в глубине модуляции КОВ: для линейно поляризованного ASE глубина модуляции составляла ~ 10 dB, для случайно поляризованного — ~ 3.4 dB.

Измерена зависимость радиуса кривизны КОВ от угла изгиба. Минимальное достигнутое значение радиуса кривизны при угле 90° составляет около 20 mm. Данный эффект обеспечивает возможность плавной перестройки лазерного излучения путем последовательного варьирования угла изгиба КОВ.

Предложенный лазер с помощью спектрального фильтра на основе КОВ может осуществлять перестройку центральной длины волны генерации лазера в зависимости от его угла изгиба. При углах $< 30°$ наблюдается однодлинноволновая генерация с изменяющейся центральной длиной волны в узком диапазоне от 2066.8 до 2069.3 nm. В диапазоне от 45° до 90° наблюдается тенденция к последовательной перестройке длины волны от 2049 nm до 2083 nm. Также существуют угловые положения с резким изменением длины волны (более 20 nm). Эти переключения связаны с изменением профиля потерь при изгибе КОВ. Когда текущая линия генерации испытывает большие потери и генерация на этой длине волны становится невыгодной по потерям, происходит переключение на соседний максимум пропускания фильтра. Это подтверждается экспериментальными данным: переключение длины волны происходит на величину, кратную FSR $= 1.6 \pm 0.1$ THz.

Из данных результатов можно сделать вывод, что если требуется сделать перестройку непрерывной, нужно сделать профиль усиления более пологим. Это можно сделать, добавив в резонатор дополнительный фильтр, который будет компенсировать неравномерность профиля усиления. Реализовать этот фильтр можно аналогичным образом, использовав КОВ. Для этого нужно

или уменьшить длину КОВ (это увеличит FSR), или увеличить диаметр его перетяжки.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-72-10120.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] J. Wang, W. Zhang, L. Li, Q. Yu. Appl. Phys. B. **103** (2), 263–269 (2011). DOI: 10.1007/s00340-011-4550-z
[2] S. Diaz, D. Leandro, M. Lopez-Amo. J. Lightwave Technology, **34** (19), 4591–4595 (2016). DOI: 10.1109/JLT.2016.2541866
[3] A. Pal, S.Y. Chen, R. Sen, T. Sun, K.T.V. Grattan. Laser Phys. Lett., **10** (8), 085101 (2013). DOI 10.1088/1612-2011/10/8/085101
[4] X.L. Zhang, K.J. Zhou, N.Q. Ngo, T.H. Tan, W.C. Poon. Laser Phys., **20** (7), 1625–1628 (2010). DOI: 10.1134/S1054660X10130219
[5] R.J. De Young, N.P. Barnes. Appl. Opt., **49** (4), 562–567 (2010). DOI: 10.1364/AO.49.000562
[6] F. Gibert, D. Edouart, C. Cenac, P. Monnier. In: *Proc. SPIE 11180, International Conference on Space Optics — ICSO 2018*, p. 111805D. DOI: 10.1117/12.2536112
[7] A.D. Vladimirskaya, I.A. Lobach, S.I. Kablukov, V.A. Kamynin. In: *Proc. SPIE 11901, Advanced Sensor Systems and Applications XI*, p. 119010H. DOI: 10.1117/12.2601428
[8] N.M. Fried, K.E. Murray. J. Endourol., **19** (1), 25–31 (2005). DOI: 10.1089/end.2005.19.25
[9] W.Y. Khoder, K. Zilinberg, R. Waidelich, C.G. Stief, A.J Becker, T. Pangratz, G. Hennig, R. Sroka. J. Biomed. Opt., **17** (6), 068005 (2012). DOI: 10.1117/1.JBO.17.6.068005
[10] H. Ahmad, S.A. Reduan, M.F. Ismail, K. Thambiratnam. Quant. Electron., **48** (10), 930–935 (2018). DOI: 10.1070/QEL16287
[11] F. Wang, A. Rozhin, V. Scardaci, Z. Sun, F. Hennrich, I.H. White, W.I. Milne, A. C. Ferrari. Nat. Nanotechnol., **3** (12), 738–742 (2008). DOI: 10.1038/nnano.2008.312
[12] J. Li, Z. Sun, H. Luo, Z. Yan, K. Zhou, Y. Liu, L. Zhang. Opt. Express, **22** (5), 5387–5399 (2014). DOI: 10.1364/OE.22.005387
[13] J. Tang, J. Sun, L. Zhao, T. Chen, T. Huang, Y. Zhou. Opt. Express, **19** (15), 14682–14689 (2011). DOI: 10.1364/OE.19.014682
[14] G. Ye, K.K. Chow, T. Shirahata, B. liu, N. Yamaguchi, M. Dai, Y. Ma, S. Yamashita, S.Y. Set. In: *Fiber Lasers XXI: Technology and Systems*, 2024. DOI: 10.1117/12.2692257
[15] A.V. Shirmankin, V.A. Kamynin, A.D. Zverev, D.A. Guryev, Y.G. Gladush, D.V. Krasnikov, A.G. Nasibulin, V.B. Tsvetkov. Optical Fiber Technology, **95**, 104457 (2025). DOI: 10.1016/j.yofte.2025.104457
[16] L. Zhang, K. Zhu, Y. Yao, X. Tian, H. Xu, Z. Nie. J. Micromachines, **14** (11), 116–138 (2023). DOI: 10.3390/mi14112026
[17] K. Kieu, M. Mansuripur. Opt. Lett., **31** (16), 2435–2437 (2006). DOI: 10.1364/ol.31.002435
[18] H. Ahmad, M.J. Faruki, Z.C. Tiu, K. Thambiratnam. Opt. Commun., 387, 84–88 (2017). DOI: 10.1016/j.optcom.2016.11.039
[19] M. Mansor, A.M. Nawi, N.H.Z. Abidin, M.F. Omar, M.A. Mahdi, M.H.A. Bakar. Pertanika J. Sci. Technol., **28** (4), 1267–1275 (2020). DOI: 10.47836/pjst.28.4.07
[20] Y. Feng, X. Li, S. Zhang, M. Han, J. Liu, Z. Yang. IEEE Photon. Technol. Lett., **29** (24), 2175–2178 (2017). DOI: 10.1109/LPT.2017.2768071
[21] M. Melo, O. Frazao, A.L.J. Teixeira, L.A. Gomes, J.R.F. da Rocha, H.M. Salgado. Appl. Phys. B, Lasers Opt., **77**, 139–142 (2003). DOI: 10.1007/s00340-003-1253-0