

УДК 535.41

О ЧАСТОТНОЙ СЕЛЕКЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА С ОТРАЖАТЕЛЬНЫМ ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ*

В. С. Терентьев, В. А. Симонов

*Учреждение Российской академии наук
Институт автоматизи и электрометрии Сибирского отделения РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: terentyev@iae.nsk.su*

Изложены результаты применения в волоконной оптике многолучевого двухзеркального отражательного интерферометра (ОИ), имеющего аппаратную функцию в отражении, подобную аппаратной функции интерферометра Фабри — Перо в пропускании. В состав двухзеркального резонатора ОИ входило два плоских зеркала, одно из которых высокоотражающее, другое — с асимметрией коэффициента отражения с разных сторон. Отражённый от ОИ свет заводился в оптическое волокно с помощью коллиматорной линзы. Оптическое волокно, коллиматор и ОИ образовывали конструкцию волоконно-интегрированного ОИ, который впервые применялся для плавной перестройки длины волны излучения кольцевого эрбиевого волоконного лазера с непрерывным режимом генерации в спектральном диапазоне 1520–1566 нм.

Ключевые слова: отражательный многолучевой интерферометр, волоконный лазер, модовая селекция.

Введение. В работах [1, 2] проведены исследования одного из вариантов многолучевого двухзеркального интерферометра — отражательного интерферометра (ОИ), оптические свойства которого расширяют и дополняют свойства интерферометра Фабри — Перо (ИФП). Отражательный интерферометр создаёт в отражённом свете «необращённую» интерференционную картину, которая представляет собой узкие светлые полосы на тёмном фоне. В общем случае профиль интенсивности этих полос асимметричен, они могут быть использованы для узкополосной фильтрации излучения. При специальном выборе параметров зеркал ОИ формирует «трансмиссионную» картину, которая имеет симметричный профиль интенсивности, подобный профилю Эйри у ИФП в проходящем свете. Зависимость формы профиля аппаратной функции ОИ в отражении описывается тремя независимыми параметрами (профиль Эйри — двумя), что даёт возможность более гибко подбирать его форму в соответствии с целью исследований. «Необращённый» профиль ОИ в отражении можно получить, если внести в структуру переднего (со стороны источника света) зеркала интерферометра поглотитель таким образом, чтобы коэффициенты отражения у зеркала стали различными (малый — в сторону источника света и близкий к единице — в сторону резонатора ОИ). Такой асимметрии коэффициентов отражения можно добиться с помощью использования в составе многослойного покрытия тонкой (толщина много меньше длины волны света) металлической плёнки или дифракционной решётки, а также дифракционной фазовой решётки [3].

В лазерной оптике ОИ применялись для селекции поперечных, продольных мод и длины волны излучения лазеров с открытым резонатором [4, 5]. В последнее время ведутся исследования по применению ОИ в волоконной оптике [6]. Для селекции здесь также могут

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (грант № П1264), проектов Отделения физических наук и Президиума РАН.

использоваться призмы, дифракционные решётки, двухлучевые и многолучевые селективные элементы, при этом излучение необходимо заводить в оптическое волокно. С помощью коллиматорной линзы нетрудно завести излучение в многомодовое волокно, гораздо сложнее это сделать в случае одномодового волокна. Одномодовые волокна в лазерной оптике являются фильтром поперечных оптических мод, а их основная мода очень близка к гауссовской TEM_{00} -моду свободного пространства (для горловины моды теоретически интеграл перекрытия составляет более 99 %). Зачастую сколлимированные пучки на выходе реальных волоконных лазеров имеют критерий $M^2 < 1,1$. Поэтому селектор в волоконных приборах обычно выполняет дискриминацию только продольных мод. При заведении света в одномодовое волокно его значительная доля может теряться из-за несовершенства оптических элементов. В связи с этими трудностями широко используются полностью волоконные компоненты, в частности узкополосная брэгговская решётка [7], спектральный контур коэффициента отражения которой может перестраиваться по длине волны с помощью механической деформации (сжатия/растяжения) или изменения температуры волокна. Но скорость перестройки длины волны в данном случае невелика. В качестве селектора в кольцевом резонаторе используется также волоконно-интегрированный ИФП (ВИФП) [8], но для подавления обратного отражения требуется дополнительный оптический элемент — волоконно-оптический изолятор. Очевидно, что ВИФП может перестраиваться с большой скоростью (по длине волны) на необходимый спектральный интервал, обладая рекордными степенями селекции. Волоконно-интегрированный отражательный интерферометр (ВИОИ) обладает всеми свойствами ВИФП, и дополнительно ему не требуется никаких оптических элементов, т. е. при прочих равных условиях он вносит в резонатор лазера меньшее количество потерь, работая в отражённом свете. ВИОИ применяется в линейной схеме резонатора, что затруднительно для ВИФП, который для нормального падения света ограничен только кольцевой схемой. Вероятно, ВИФП можно использовать подобно наклонному ИФП в открытом резонаторе [9], однако из-за конечной ширины пучка будут снижены максимальный коэффициент отражения и резкость интерференционных полос.

Цель данной работы состоит в том, чтобы показать возможность использования высокодобротного ОИ в волоконной оптике в спектральном диапазоне 1500–1600 нм и применить его на практике для плавной перестройки длины волны излучения волоконного лазера.

Волоконно-интегрированный отражательный интерферометр. Для вычисления аппаратной функции ВИОИ (рис. 1) можно воспользоваться методом суммирования полей световых пучков, отражённых от ОИ, с учётом заведения в волокно. Аппаратная функция ОИ описывается формулой Ами [10] и должна быть такой же для ВИОИ при идеальном заведении излучения в волокно. В случае разъюстировки зеркал ОИ лучи, не попадающие в апертуру световедущей области волокна, будут исключаться из оптической системы, а при неполном перекрытии возбуждать моду волокна лишь частично. Если представить основную моду HE_{11} волокна через аналитическую аппроксимацию гауссовским TEM_{00} -профилем $e^{-\frac{x^2+y^2}{w^2}}$ (w — радиус горловины гауссовского пучка) [11], то при нормальном угле падения на торец можно вычислить амплитудный коэффициент k заведения для пучка, частично перекрывающегося со световедущей апертурой волокна (смещение только по оси x):

$$k(\delta W) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}W} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{w^2}} e^{-\frac{(x-\delta W)^2}{w^2}} dx = e^{-\frac{\delta W^2}{2w^2}}, \quad (1)$$

где δW — величина децентровки апертур пучка и световедущей области волокна. В экспериментах использовалось волокно марки SMF-28e, у которого согласно спецификации

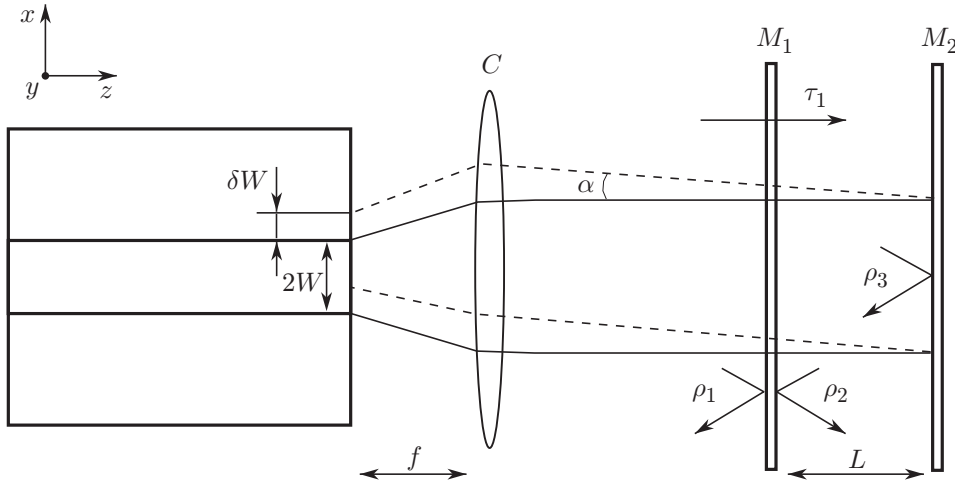


Рис. 1. Схема ВИОИ: $M_{1,2}$ — зеркала интерферометра; $\rho_{1,2}, \tau_1$ — амплитудные коэффициенты отражения и пропускания зеркала M_1 соответственно; ρ_3 — коэффициент отражения зеркала M_2 ; L — расстояние между зеркалами; f — фокусное расстояние коллиматорной линзы C ; α — угол отклонения

$W = 5,3$ мкм для длины волны 1550 нм. Для получения аппаратной функции ВИОИ необходимо амплитуду каждого пучка, отражённого от ОИ, умножать дополнительно на коэффициент k , учитывая, что каждый последующий пучок при разъюстировке отклоняется на больший угол пропорционально своему номеру. Пусть нулевой пучок точно совмещён с центром волокна, тогда отклонение последующих пучков будет нарастать линейно, как $m\delta W$ (m — номер пучка), в результате, учитывая формулу (1) и считая углы падения пучков нормальными, имеем

$$\rho(\psi) = \rho_1 + \tau_1^2 \rho_3 e^{-2j\psi} \sum_{m=0}^{\infty} (\rho_2 \rho_3 e^{-2j\psi})^m e^{-\frac{(m+1)^2 \delta W^2}{2W^2}}, \quad (2)$$

где $\psi = 2\pi L/\lambda$ — набег фаз между зеркалами; $\rho_i = \sqrt{R_i} e^{j\Psi_i}$ и $\tau_1 = \sqrt{T_1} e^{j\Phi_1}$ ($i = 1, 2, 3$) — комплексные амплитудные коэффициенты отражения и пропускания зеркал ВИОИ соответственно (см. рис. 1). Формула (2) используется для численного моделирования параметров аппаратной функции ВИОИ. Абсолютное значение величины δW определяется чувствительностью угловых подвижек (предельный малый угол α) и фокальным расстоянием линзы f : $\delta W \approx f\alpha$. Дополнительный множитель $e^{-\frac{(m+1)^2 \delta W^2}{2W^2}}$ в (2) по сравнению с классической формулой меньше единицы при $\delta W > 0$, что снижает максимальный коэффициент отражения и резкость полос ВИОИ.

На рис. 2 изображён расчётный профиль аппаратной функции ОИ (энергетический коэффициент отражения $R = |\rho|^2$) для случая $\delta W = 0$ (сплошная кривая) и для $\delta W = 0,05W$ (пунктирная кривая) при следующих параметрах: $R_1 = 0,11$, $\Psi_1 = 2,21$, $R_2 = 0,86$, $\Psi_2 = 3,11$, $T_1 = 0,063$, $\Phi_1 = 0,26$, $R_3 = 1,0$, $\Psi_3 = \pi$. Расчётная резкость полос аппаратной функции на рис. 2, соответствующая данным параметрам, равна 30 (для случая $\delta W = 0$) и ≈ 20 (для случая $\delta W = 0,05W$). Максимальный коэффициент отражения ВИОИ снижается при разъюстировке, и степень снижения при одинаковых δW тем выше, чем больше эффективное число интерферирующих пучков. В наших экспериментах использовались угловые подвижки, обеспечивающие точность угла подстройки α , как минимум, 30 мкрад, фокальное расстояние коллиматорной линзы $f = 7,5$ мм. Таким образом, $\delta W_{\min} = 0,045W$.

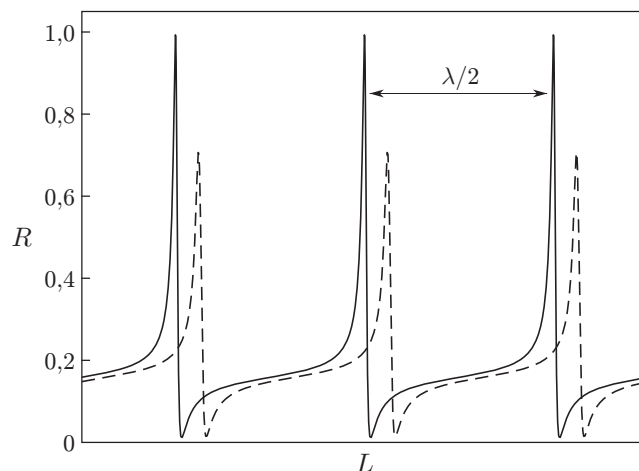


Рис. 2. Расчётные профили коэффициента отражения ВИОИ: идеальный случай пространственно согласованных ОИ и волокна (сплошная кривая), разъюстированный ВИОИ (пунктирная кривая)

Заднее зеркало M_2 29-слойное (TiO_2 , SiO_2) на кварцевой подложке с коэффициентом отражения $>99,8\%$ в спектральном интервале 1500–1600 нм. Переднее зеркало M_1 изготавливалось по стандартной методике, изложенной в [2]. На кварцевую подложку методом резистивного напыления в вакууме наносилась тонкая никелевая плёнка (в расчётах толщина принималась равной 14,5 нм, $n_{\text{Ni}} = 2,89 - j5,08$ [12]). Нанесённая плёнка отражала со стороны кварцевой подложки 15 % света. Методом резистивного испарения в вакууме на никелевую плёнку были нанесены четыре слоя диэлектриков $(\text{LH})^2$ (L — MgF_2 , H — ZnS) с оптической толщиной $\lambda/4$. Энергетические коэффициенты изготовленного зеркала имели следующие величины ($\lambda = 1550$ нм): $R_1 = 0,06$, $R_2 = 0,71$, $T_1 = 0,13$. Резкость полос, соответствующая этим величинам, составила около 18,3. Экспериментальные аппаратные функции ВИОИ представлены на рис. 3. Два профиля коэффициента отражения ВИОИ R в зависимости от расстояния между зеркалами L записаны с помощью цифрового осциллографа TDS 3032В фирмы "Tektronix" (США). Для уменьшения влияния цифровых шумов осциллографа на линию профиля к развёртке по оси абсцисс была применена численная

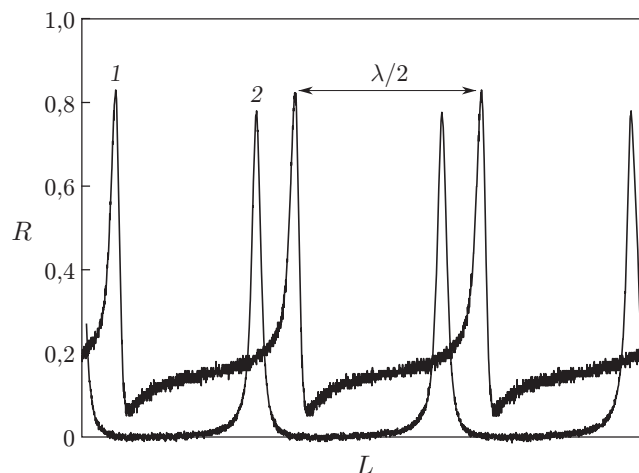


Рис. 3. Экспериментальные профили коэффициента отражения ВИОИ: асимметричный (1) и симметричный (2)

процедура аппроксимации полиномом третьей степени. Профиль 1 имеет ярко выраженную асимметрию подобно расчётному профилю на рис. 2. Профиль 2 с малой степенью асимметрии подобен аппаратной функции ИФП в пропускании. Оба профиля специально смещены относительно друг друга на небольшое расстояние для лучшего визуального сравнения. В эксперименте максимумы этих профилей совпадали друг с другом по фазе. ВИОИ имел в отражении два этих профиля, причём один переходил в другой скачком. Из теории отражательных интерферометров известно, что асимметричный профиль в отражении ОИ стремится к симметричной форме, если уменьшается коэффициент отражения нулевого луча: $\rho_1 \rightarrow 0$. Эффект скачкообразного изменения формы аппаратной функции ВИОИ объяснить с помощью формулы (2) нельзя. Можно предположить полное отсечение моды, возбуждаемой нулевым лучом ОИ, при распространении её по волоконно-оптической системе. В этом конкретном случае волоконная система действует избирательно только на нулевой луч: то включая, то исключая его из оптической системы. Максимальный коэффициент отражения ВИОИ, по нашим расчётам, достигал 83 %, что является хорошим результатом. При скачке на симметричный профиль коэффициент отражения снижался на величину порядка 5–10 %, что согласуется с расчётами. Предполагается, что при изготовлении ОИ с симметричным или трансмиссионным профилем отражения (подобно профилю 2 на рис. 3) можно избавиться от паразитного эффекта изменения формы профиля и уменьшения максимального коэффициента отражения. Профиль 2 имеет бóльшую контрастность, чем профиль 1, что полезно при селекции излучения с точки зрения дискриминации мод по добротности резонатора. Резкость полос ВИОИ составляет 14,5, что близко к величине 18,3 из экспериментальных измерений коэффициентов зеркала M_1 , но меньше расчётной (см. рис. 2) в 2 раза. Более низкое значение резкости полос ОИ приводит к меньшей чувствительности всей системы ВИОИ к разъюстировке (максимальный коэффициент отражения на рис. 3 больше, чем для пунктирного профиля на рис. 2).

Данный ВИОИ имеет конструктивные несовершенства, которые требуют устранения для улучшения его характеристик. Недостатки заключаются в потерях света при обратном заведении в волокно и снижении максимального коэффициента отражения. Торцы волокна были изготовлены с помощью скалывателя СТ-30 фирмы "Fujikura" (Япония) и не просветлялись, что вносило в оптическую систему энергетические потери, как минимум, 3 %. Степень идеальности скола (плоскостность, угол) точно не определялась, лучшим вариантом могла быть, по-видимому, процедура шлифовки и просветления заклеенного волокна в центрирующем держателе (ферулле). Выбор материала тонкоплёночного многослойного покрытия, способов его изготовления и параметры тонкой металлической плёнки также могут улучшить характеристики ВИОИ. Для создания интерференционной картины с резкостью полос порядка 100 необходимо использовать подложки с лучшей плоскостностью, которая в наших экспериментах составляла $\lambda/2$ для обоих зеркал.

Селекция частоты волоконного лазера. Схема установки волоконного лазера с кольцевым резонатором для селекции длины волны излучения показана на рис. 4. Резонатор состоял из волокна SMF-28e (15 м), в том числе легированного волокна Er^{3+} (5 м). Накачка производилась лазерным диодом (ЛД) через спектрально-волновой уплотнитель каналов (ВУК) на длине волны 980 нм. Излучение распространялось в направлении по часовой стрелке. Обратное распространение пресекалось волоконным циркулятором (ВЦ), который сначала направлял свет на соседний (средний) волоконный порт, а отражённый свет со среднего порта — в порт в направлении волоконного ответвителя (ВО) (с коэффициентом ответвления 5 %). Эта часть излучения шла на выход лазера. Для исследования свойств и настройки (юстировки) ВИОИ такой кольцевой лазер использовался как источник непрерывного излучения на длине волны 1550 нм. В этом случае применялась комбинация А блоков, обозначенных пунктирной линией. Длина волны лазера стабилизировалась по пику отражения волоконной брэгговской решётки (ВБР). На выходе лазера

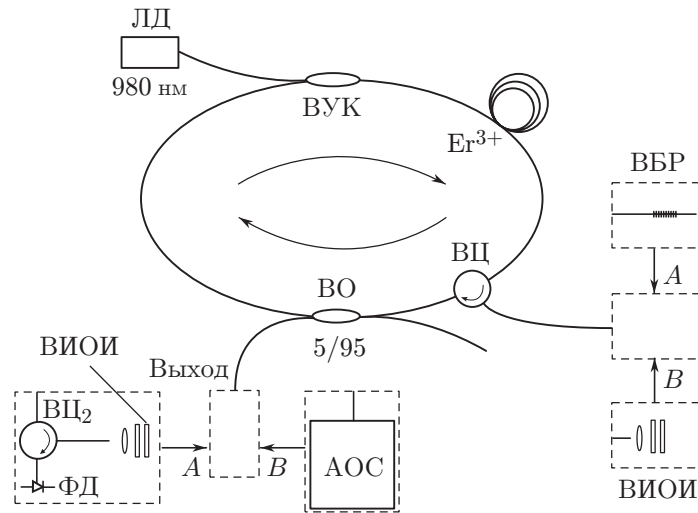


Рис. 4. Схема волоконного кольцевого лазера для перестройки длины волны

размещалась система из ВЦ₂, ВИОИ и фотодетектора (ФД), последний измерял интенсивность отражённого от ВИОИ света. Так как частота света, падающего на ВИОИ, была постоянной, то, сканируя заднее зеркало ОИ в направлении оптической оси системы, т. е. изменяя набег фаз $\psi = 2\pi L/\lambda$ между зеркалами, можно наблюдать аппаратную функцию в отражении (см. рис. 3) и юстировать зеркала ВИОИ. Для области свободной дисперсии порядка 50–100 нм на длине волны $\lambda = 1550$ нм необходимо поверхности плоских зеркал ВИОИ расположить на расстоянии $12 < L < 24$ мкм. Минимальное расстояние L , на которое удалось сблизить зеркала ОИ, составило 25 мкм. Дальнейшее сближение приводило к взаимному касанию кромок зеркал, и юстировка всей системы сильно усложнялась. Диаметр подложек составлял 2 см, а падающего пучка — 1 мм. В целях упрощения юстировки и увеличения области свободной дисперсии ОИ диаметр подложек должен быть уменьшен до 5–10 мм. Сближение зеркал приводило к снижению потерь света на рассеяние и увеличивало коэффициент заведения в волокно (максимальный коэффициент отражения ВИОИ).

Компоненты ВИОИ юстировались угловыми и линейными подвижками (см. рис. 1). Волокно центрировано относительно апертуры линзы с помощью феруллы, а торец волокна можно подстраивать с помощью линейной (вдоль оптической оси) микроподвижки. Линза и зеркало M_1 имели две угловые микроподвижки, а зеркало M_2 — ещё и линейную (вдоль оптической оси). Расстояние между торцом волокна и коллиматорной линзой C выбиралось по максимуму интенсивности профиля аппаратной функции ВИОИ (см. рис. 3).

При перестройке длины волны излучения лазера использовалась комбинация блоков в положении B (см. рис. 4). Отражательный интерферометр устанавливался вместо ВБР и выполнял роль отражательного оптического фильтра. Генерируемое лазером излучение фиксировалось волоконным анализатором оптического спектра (АОС) AQ6370 фирмы "Yokogawa" (Япония), с помощью которого можно было определять текущую длину волны излучения лазера.

На рис. 5 приведены два нормированных профиля спектрального распределения интенсивности суперлюминесценции активной среды лазера в подпороговом режиме генерации с ВИОИ и без него. Из рисунка видно, какую степень спектральной селективности он вносит в резонатор лазера. Пики отражения ВИОИ могли плавно перестраиваться при изменении расстояния между зеркалами ОИ (с помощью напряжения на пьезокерамике).

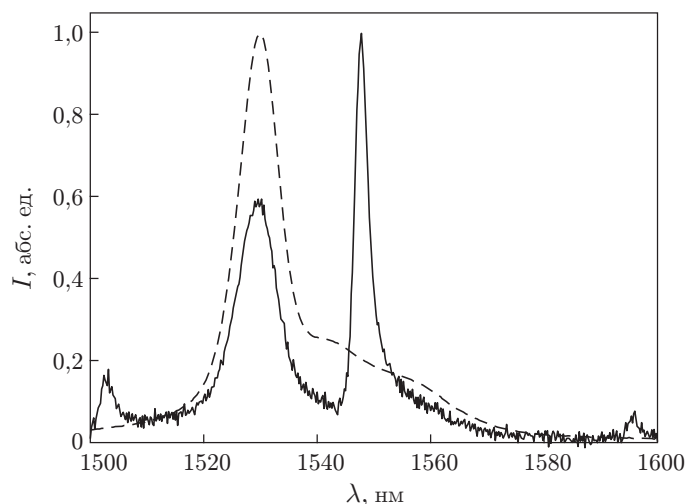


Рис. 5. Спектральное распределение интенсивности суперлюминесценции активной среды лазера в подпороговом режиме генерации: без ВАОИ (пунктирная кривая), с ВАОИ (сплошная кривая)

Спектральная ширина линии генерации лазера составляла не более 0,02 нм (предел разрешения АОС). Была замечена нестабильность модового состава лазера при плавной перестройке: на короткое время лазер переходил в режим генерации двух частот с интервалом порядка 0,1–0,2 нм. Подобные эффекты могут быть связаны с низкой избирательной способностью данного конкретного ВАОИ, низкочастотными колебаниями интерферометра из-за эффектов теплового расширения и нестабильности источника постоянного напряжения, а также паразитных интерференций на волоконных компонентах. Для изучения данной проблемы спектральный контур отражения ОИ (около 1550 нм, см. рис. 5) детально рассмотрен при большем разрешении на спектроанализаторе. Время сканирования контура порядка 30 с. На линии профиля были видны наложенные на него паразитные периодические колебания малой амплитуды (5 % от полной амплитуды, период $\approx 0,15$ нм). При плавной перестройке максимума контура ОИ по длине волны генерация будет идти преимущественно на пиках, которые спектрально статичны. Предположительно волоконный циркулятор может вносить подобный паразитный интерференционный сигнал, не исключено влияние шумов лазерного диода накачки. Для максимального уменьшения влияния этого или других паразитных эффектов необходимо устранить все лишние источники паразитной интерференции, например использовать ВАОИ в качестве зеркала в линейном резонаторе при применении минимального количества волоконных оптических элементов.

В результате экспериментов удалось плавно перестроить длину волны излучения волоконного кольцевого лазера в спектральном диапазоне 1520–1566 нм (46 нм). Мощность генерации лазера составляла порядка 1 мВт, что не является пределом (в данной конструкции многослойное покрытие переднего зеркала ОИ способно выдержать мощность ~ 1 Вт).

Улучшения характеристик лазерного излучения можно добиться путём повышения селективности, если увеличивать контрастность и резкость полос ВАОИ, что подразумевает изготовление трансмиссионного варианта ВАОИ. Для стабилизации мощности и длины волны излучения, по-видимому, могут потребоваться методы активной стабилизации.

Заключение. В данной работе проведено исследование свойств и возможностей применения отражательного многолучевого интерферометра в волоконной оптике в целях спектральной селекции лазерного излучения. Рассмотрена аппаратная функция предла-

гаемого интерферометра с учётом волоконной специфики. Изготовлен отражательный интерферометр с открытым резонатором и волоконным заведением отражённого от него света. Проведены эксперименты по измерению его аппаратной функции. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с теорией и расчётом. Отражательный интерферометр впервые применён в спектральной области длин волн около 1550 нм. Осуществлена плавная перестройка длины волны излучения кольцевого волоконного лазера в спектральном диапазоне 1520–1566 нм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Троицкий Ю. В.** Одночастотная генерация в газовых лазерах. Новосибирск: Наука, 1975. 159 с.
2. **Троицкий Ю. В.** Многолучевые интерферометры отраженного света. Новосибирск: Наука, 1985. 208 с.
3. **Терентьев В. С.** Многолучевые интерферометры в отраженном свете с «необращенной» аппаратной функцией // Автометрия. 2009. **45**, № 6. С. 89–98.
4. **Троицкий Ю. В.** Сравнение методов селекции продольных мод оптического резонатора // Журн. прикл. спектроскопии. 1970. **12**, № 3. С. 425–431.
5. **Троицкий Ю. В.** Тонкослойная дифракционная решетка в оптическом резонаторе стоячей волны // Оптика и спектроскопия. 1969. **27**, № 3. С. 492–496.
6. **Babin S. A., Kablukov S. I., Terentiev V. S.** Reflection interferometer based on the Troitsky thin film for frequency selection in fiber lasers // Laser Phys. 2008. **18**, N 11. P. 1241–1245.
7. **Song Y. W., Havstad S. A., Starodubov D. et al.** 40-nm-wide tunable fiber ring laser with single-mode operation using a highly stretchable FBG // IEEE Photon. Technol. Lett. 2001. **13**, N 11. P. 1167–1169.
8. **Zyskind J. L., Sulhoff J. W., Stone J. et al.** Electrically tunable diode-pumped erbium-doped fiber ring laser with fiber Fabry—Perot etalon // Electron. Lett. 1991. **27**, N 21. P. 1950–1951.
9. **Донин В. И.** Мощные ионные газовые лазеры. Новосибирск: Наука, 1991. 208 с.
10. **Наму М.** Sur les franges de reflexion des lames argentees // Journ. de Phys. 1906. **5**. P. 789–809.
11. **Agrawal G. P.** Fiber-optic communication systems. John Wiley & Sons, 2002. 546 p.
12. **Шкляревский И. Н., Падалка В. Г.** Измерение оптических постоянных меди, золота, никеля в инфракрасной оптической области спектра // Оптика и спектроскопия. 1959. **6**. P. 78–84.

Поступила в редакцию 25 марта 2011 г.
