

УДК 535

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА С ЗЕРКАЛАМИ
ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ****А.С. Сырнева, В.В. Чесноков***Сибирский государственный университет геосистем и технологий*

Оптические системы с зеркалами полного внутреннего отражения (ПВО) привлекают внимание исследователей возможностью существенного уменьшения оптических потерь в оптических устройствах. Известны неоднократные попытки создания интерференционных многолучевых фильтров со слоистой структурой, содержащих зеркала ПВО, однако не удалось добиться ожидаемого уменьшения оптических потерь. В работах [6–8] объяснение этому найдено в существовании резонансной дифракции волн в слоистых системах с ПВО, что приводит к необходимости увеличивать поперечные размеры подобных слоистых систем: при обычных размерах волна, распространяясь в структуре под не равным нулю углом падения, быстро уходит из оптической апертуры прибора в боковом к падающему излучению направлении. В настоящей работе исследуется кубический оптический резонатор с зеркалами ПВО, в котором вошедшая в резонатор волна также распространяется в связи с наклонным падением на грань кубика в поперечном направлении, но ее траектория «закольцована», что заставляет волну многократно возвращаться в область оптической апертуры и обеспечивать увеличение прозрачности оптического резонатора. В статье представлены предварительные результаты теоретического и экспериментального исследования разработанного оптического кубического резонатора бегущей волны. Кубик резонатора со стороной 10 мм изготовлен из стекла К8, качеству полировки граней соответствуют примерно одна-две интерференционных полос, погрешность выполнения углов между гранями порядка нескольких угловых секунд. Ввод излучения гелий-неонового лазера в резонатор и вывод осуществлены традиционным для ввода излучения в планарные волноводы методом – с помощью прижатых к поверхности грани кубика оптических призм, волна туннелирует сквозь воздушный зазор между поверхностями призмы и грани. Показано, что, в отличие от эталона Фабри–Перо значения угловой дисперсии интерференционного фильтра с оптическим резонатором в сагиттальной и меридиональной плоскостях существенно отличаются. В соответствии с расчетом отсутствие оптических потерь на зеркалах ПВО увеличивает количество эффективных полных замкнутых траекторий в резонаторе до 800...1000, что на порядок больше, чем в эталонах с металлическими зеркалами. Полученные результаты подтверждают, что использование полноотражающих граней кубика в качестве зеркал обеспечивает резонатору существенно меньшие оптические потери в сравнении с эталонами Фабри–Перо, имеющими металлические зеркала; выявлено наличие анизотропии угловой дисперсии фильтра. Рассматривается применение оптических резонаторов с гранями полного внутреннего отражения в качестве узкополосных оптических фильтров, пригодных для исследования спектров лазерных излучателей, а также при разработках мощных миниатюрных твердотельных лазеров с повышенной оптической прочностью выходного зеркала.

Ключевые слова: оптический резонатор, эталон Фабри–Перо, полное внутреннее отражение, многолучевая интерференция, узкополосная фильтрация, оптическая апертура, оптическое туннелирование, оптические призмы, резонансная дифракция, световая волна.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-4-118-127

Введение

Настоящее исследование лежит в рамках поиска оптимальных решений по созданию узкополосных многолучевых интерференционных оптических фильтров

различных диапазонов спектра, зеркала которых обладают малыми потерями благодаря использованию эффектов полного внутреннего отражения (ПВО) света на границе прозрачных сред с различными показателями преломления

1. Постановка задачи

Рассматриваются вопросы создания интерференционных устройств типа оптических узкополосных фильтров, использующих полное внутреннее отражение (ПВО) от границ с внешней средой. Примером достижения рекордных значений узкополосности интерферометра Фабри–Перо с диэлектрическими зеркалами (резкость 150 000) являются результаты работы [1]. Возможности снижения оптических потерь при использовании в многолучевых интерферометрах эффектов полного внутреннего отражения рассмотрены в работах [2–4, 9]. В работе [15] методом численного моделирования продемонстрирована возможность создания многолучевого отражательного интерферометра на эффектах полного внутреннего отражения в одномодовом волокне с оболочкой. Вопросы расчета коэффициента отражения металл-диэлектрических зеркал при нарушенном полном внутреннем отражении рассмотрены в работе [16]. Устройство двухлучевого интерференционного фильтра полного внутреннего отражения, предназначенного для уменьшения фонового пропускания фильтров при спектральных исследованиях, рассматривается в патенте [17]. В монографии [5] приведен теоретический анализ слоистых полноотражающих фильтров, основанный на классической модели многолучевых интерферометров Фабри–Перо. Предполагалось, что отсутствие потерь в зеркальных прослойках может обеспечить высокую прозрачность фильтров и узкую спектральную полосу пропускания, однако практических устройств такого качества создать не удалось. В работах [6–8] причины малой прозрачности слоистых оптических фильтров полного отражения объясняются ролью краевого резонансного дифракционного процесса, имеющего место при вводе излучения под косым углом в слоистую структуру ограниченных размеров [7].

В настоящей работе, являющейся продолжением [11, 12, 13], решается задача исследования характеристик оптического многолучевого интерференционного фильтра с зеркалами ПВО, конструкция которого исключает влияние краевого дифракционного эффекта.

Исследование проведено в рамках разработки интерференционных устройств типа оптических резонаторов и оптических узкополосных фильтров, использующих полное внутреннее отражение (ПВО) от границ с внешней средой, описанной в статье [11, 12], где содержатся также ссылки на литературу. В работе [10] приведены расчеты характеристик полноотражающих светофильтров, выполненных с использованием результатов [4]. Оптическая схема резонатора с призмными устройствами ввода-вывода излучения показана на рис. 1, слева; справа приведена фотография кубического резонатора и призм ввода и вывода излучения; схема экспериментального стенда приведена на рис. 2.

Резонансный элемент выполнен в виде резонатора бегущей волны типа «шепчущей галереи» с замкнутой траекторией волны (рис. 1). Излучение 4 вводится в кубический прозрачный резонатор 1 через призмный элемент связи 2 , расположенный от него с воздушным зазором, позволяющим волне туннелировать в кубик. Волна испытывает на гранях кубика полное отражение, при угле преломления $\theta = \pi/4$ траектория волны замкнутая; излучение выводится из резонатора через призму 2 ввода, а также через вторую призму 3 , расположенную также с возможностью туннелирования волны в нее. Отсутствие оптических потерь при полном внутреннем отражении позволяет использовать моды резонатора со значительно большим числом отражений от зеркал в сравнении с эталоном Фабри–

Перо. Показатели преломления кубического резонатора и призмных элементов связи – n_1 и n_3 соответственно; t и n_2 – ширина зазора, позволяющего волне туннелировать в кубик, и показатель преломления зазора соответственно; c – размер грани резонатора.

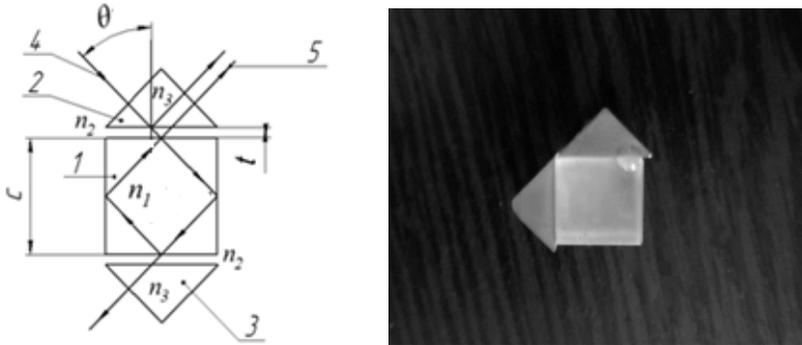


Рис. 1. Схема оптического резонатора полного внутреннего отражения

Fig. 1 – Scheme of the optical resonator of total internal reflection

Формулы для основных оптических параметров кубического резонатора в соответствии с [12] приведены ниже.

Оптическая разность хода двух соседних вышедших из призмы 2 по направлению 5 лучей (рис. 1) Δ_C и Δ_M в сагиттальной и меридиональной плоскостях различна и определяется формулами:

$$\Delta_C = \frac{L_0}{\cos(\theta_0 + \delta\theta)}; \quad \Delta_M = L_0 (1 \pm \sin \delta\theta), \quad (1)$$

где $\theta_0 = \pi/4$ – угол преломления падающей на кубик волны; $\delta\theta$ – отклонения от значения θ_0 угла преломления падающей волны; $L_0 = 2\sqrt{2}cn$ – длина круговой траектории волны в кубике; c – размер стороны грани резонатора.

Условия максимумов интерференции проходящего кубик монохроматического излучения по указанным плоскостям также различны:

$$\frac{L_0}{\cos(\theta_0 + \delta\theta_m)} = m_C \lambda_0; \quad L_0 (1 \pm \sin \delta\theta_m) = m_M \lambda_0. \quad (2)$$

Здесь λ_0 – длина волны в воздухе; $\delta\theta_m$ – угловое направление на максимумы интерференции порядков m_C и m_M в сагиттальной и меридиональной плоскостях, отсчитываемое от направления θ_0 .

Уравнения (2) позволяют найти угловые значения порядков интерференции в указанных плоскостях. Учитывая, что $\delta\theta \ll \theta_0$, получим:

$$\Delta\theta_C = \frac{1}{m_0 \theta_m} \approx \sqrt{\frac{2}{m_0}}; \quad \sin \Delta\theta_M \approx \frac{1}{m_0}, \quad (3)$$

где $\Delta\theta_C$ – угловое значение центрального порядка интерференции в резонаторе в сагиттальной плоскости, $\Delta\theta_M$ – угловое значение порядков интерференции в резонаторе в меридиональной плоскости, $m_0 = n_1 L_0 / \lambda_0$ – максимальное значение

порядка интерференции. Чтобы найти значения порядков интерференции в воздушной среде, необходимо полученные значения умножить на показатель преломления кубика n_1 .

Свободная спектральная область кубического резонатора равна

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{n_1 L_0}. \quad (4)$$

Спектральная ширина полосы пропускания кубического резонатора определяется формулой

$$\delta\lambda = \frac{\lambda^2}{N_{\text{эф}} L_0 n_1}, \quad (5)$$

где $N_{\text{эф}}$ – эффективное число полных замкнутых траекторий в резонаторе, пробегаемых световой волной.

Угловой размер $\delta\theta$ интерференционного максимума внутри кубического резонатора различен в меридиональной и сагиттальной плоскостях и определяется формулами:

$$\delta\theta_M = \frac{n_1}{N_{\text{эф}} m_0}; \quad \delta\theta_C = n_1 \sqrt{\frac{2}{N_{\text{эф}} m_0}} \quad (6)$$

Разрешающая способность $\lambda_0 / \delta\lambda$ рассматриваемого оптического резонатора определяется числом $N_{\text{эф}}$ кольцевых траекторий световой волны в резонаторе.

В числе причин, ограничивающих число траекторий, необходимо учитывать влияние угловых погрешностей изготовления резонатора, оптические потери на поверхностях ПВО вследствие рассеяния на микрошероховатостях поверхности, поглощение в среде резонатора, виньетирование светового потока при прохождении резонатора, обусловленное дифракцией излучения на его гранях при отражении и увеличением расходимости с сопутствующим резким уменьшением коэффициента отражения поверхностей ПВО. Найдено, что при исключении причин, связанных с качеством изготовления, основным является виньетирование, и для предельного числа кольцевых траекторий предложено соотношение

$$N'_{\text{эф}} = \left(c \cos \frac{\pi}{4} - 2\rho_0 \right) / (\theta_{\text{расх}} L_0), \quad (7)$$

где $\theta_{\text{расх}}$ и ρ_0 – расходимость и радиус входящего в резонатор светового потока.

Принимая $\lambda_0 = 0,63$ мкм, $\theta_{\text{расх}} = (0,5 - 1) \cdot 10^{-4}$ рад, $2\rho_0 = 5$ мм, $c = 10$ мм, получим $N'_{\text{эф}} \approx 700 \dots 1400$.

Получены выражения для угловой дисперсии интерференционного фильтра с резонатором:

– в меридиональной плоскости

$$\frac{d\theta_B}{d\lambda_0} = \frac{1}{\lambda_0 \sin(\pi/4)}; \quad (8)$$

– в сагиттальной плоскости

$$\frac{d\theta_B}{d\lambda_0} = \frac{1}{\lambda_0 \theta}, \quad (9)$$

здесь θ – угол распространения световой волны в резонаторе относительно направления основной моды.

Угловая дисперсия в меридиональной плоскости имеет одинаковое значение по всей интерференционной картине; в сагиттальной плоскости в центре интерференционной картины ($\theta \rightarrow 0$) дисперсия увеличивается неограниченно, как и в случае интерферометра Фабри–Перо. Таким образом, угловая дисперсия исследуемого фильтра имеет анизотропию; физическая причина анизотропии – распространение световых волн в резонаторе путем многократного отражения от поверхностей ПВО и наклонном падении на поверхности; в классическом эталоне Фабри–Перо используется близкое к нормальному падению излучения.

Линейная ширина центрального интерференционного максимума в сагиттальной плоскости на рис. 2, наблюдаемого в фокальной плоскости камерного объектива, может быть представлена в виде

$$x_\lambda = n_1 f \sqrt{\frac{2}{N_{\text{эф}} m_0}}, \quad (10)$$

где f – фокусное расстояние камерного объектива.

Резонатор имеет монолитную конструкцию, углы между гранями кубика – зеркалами резонатора могут быть получены только с некоторой погрешностью. Погрешность приводит к тому, что траектория световой волны в резонаторе перестает быть замкнутой. В работе [14] обсуждается возможность юстировки углового положения граней резонатора за счет выполнения резонатора с поперечной регулируемой узкой щелью, заполненной иммерсионной жидкостью.

В таблице приведены полученные расчетом параметры интерферометра с размерами резонатора $10 \times 10 \times 10$ мм и параметры интерференционной картины, включая спектральные характеристики.

**Расчетные параметры интерферометра с кубическим резонатором
и интерференционной картины**
**The calculated parameters of the interferometer with a cubic resonator
and the interference pattern**

$\Delta\theta_{\text{ЛАЗ}}$, мрад	$\Delta\theta_0$, мрад	$\Delta\theta_C$, мрад	L_0 , мм	m_0	λ , нм	$N_{\text{эф}}$	$\delta\lambda$, нм/МГц
1	8	0,58	42,4	$6,7 \cdot 10^4$	630	200	$4,7 \cdot 10^{-5} / 35$
1	8	0,37	42,4	$6,7 \cdot 10^4$	630	500	$1,9 \cdot 10^{-5} / 15$

Как следует из таблицы, расчетное значение углового размера $\Delta\theta_0$ диаметра центрального максимума интерференционной картины много больше угла расходимости используемого лазерного излучения, поэтому из всей картины в фокальной плоскости объектива должна быть видна только центральная область центрального интерференционного максимума, разрешающая способность $\lambda / \delta\lambda$ может быть более $3 \cdot 10^7$ в видимом диапазоне спектра.

2. Экспериментальные результаты

На рис. 2 показана схема стенда для исследования оптического резонатора.

В состав установки входят:

- лазерный излучатель;

- измеритель интенсивности падающего излучения (приемник);
- полупрозрачное зеркало;
- камерный объектив (ОБ), который формирует интерференционную картину в своей фокальной плоскости;
- телевизионная камера (ТК), устанавливаемая в плоскости интерференционной картины;
- персональный компьютер (ПК).

Исследуемый резонатор закрепляется на столике гониометра, с возможностью его наклона и поворота.

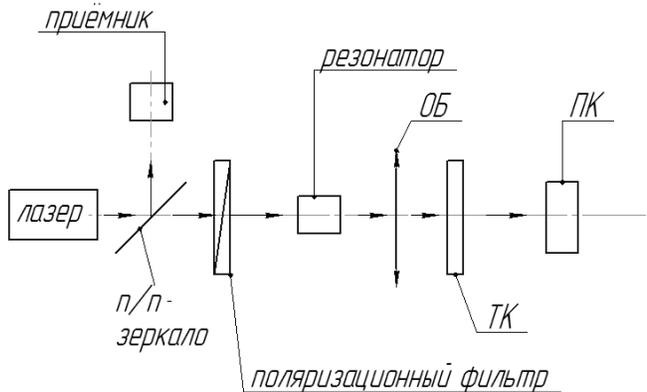


Рис. 2. Схема стенда для исследования оптического резонатора

Fig. 2 – Scheme of the stand for the study of the optical resonator

В связи с необходимостью учитывать влияние поляризационных эффектов в оптическом резонаторе, так как излучение на зеркала резонатора падает под углом, отличающемся от нормального, в состав установки введен поляризационный фильтр.

На рис. 2 излучение от He-Ne лазера падает на полупрозрачное зеркало. Часть излучения отражается от зеркала и попадает на приемник, а другая часть проходит через полупрозрачное зеркало и поляризационный фильтр в резонатор. Пройдя исследуемый резонатор, излучение объективом ОБ фокусируется на поверхность матрицы телевизионной камеры; сформированное изображение обрабатывается с помощью персонального компьютера ПК.

Для юстировки параллельности зеркал резонатора и получения интерференционной картины нами был разработан оптико-механический узел, который представлен на рис. 3. Здесь 1 – винты для прижима входной и выходной призмы к кубичку. С помощью винтов 1 и 2 можно добиться фиксации призм и кубичка и получения необходимой величины воздушного зазора между призмами и кубичком.

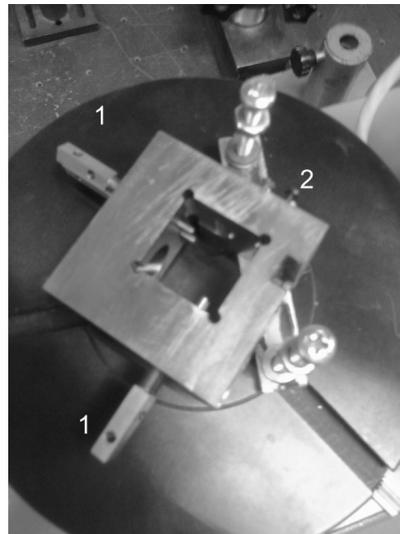


Рис. 3. Оптико-механический узел для резонатора

Fig. 3 – Opto-mechanical unit for resonator

При исследовании интерференционных картин наблюдались их виды, типичные для интерферометров Фабри–Перо, в том числе интерференционные полосы равного наклона и полосы равной толщины. Использовались экспериментальные образцы резонаторов в виде стеклянных кубиков с размерами $10 \times 10 \times 10$ и $30 \times 30 \times 30$ мм.

На фотографиях рис. 4 показаны примеры интерференционных картин, полученных с помощью телевизионной камеры.

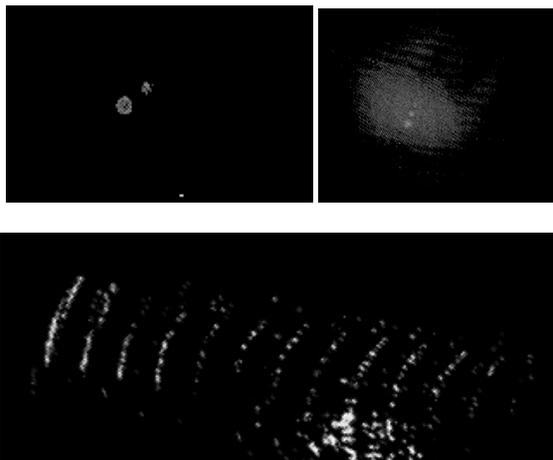


Рис. 4. Интерференционная картина, формируемая интерферометром с оптическим резонатором

Fig. 4 – The interference pattern formed by the interferometer with an optical resonator

Большее из двух светлых пятен на интерференционной картине левого верхнего фото является максимумом интерференции, имеет радиальный угловой размер $\delta\theta_C = 0,3 \cdot 10^{-3}$, на верхнем правом снимке интерференционный максимум в виде округлого пятна расположен на фоне, предположительно полос равной толщины, с угловым радиусом пятна $\delta\theta_C = 0,44 \cdot 10^{-3}$ рад, что позволяет, в соответствии с (6), оценить число кольцевых траекторий в резонаторе для данного образца величиной $N_{эф} \approx 160 - 100$. Эквидистантное расположение светлых полос на нижней фотографии говорит о том, что они могут интерпретироваться, как интерференционные полосы равной толщины.

Заключение

Рассматриваемая в сообщении аналитическая модель интерференционного узкополосного светофильтра, использующего в качестве дисперсионного элемента оптический резонатор бегущей волны с поверхностями полного внутреннего отражения, позволила обнаружить ряд особенностей его характеристик. Показано, что угловая дисперсия по разным направлениям интерференционной картины различна, т. е. отличается анизотропией; обеспечивается большее на порядки величины число кольцевых траекторий световой волны в резонаторе в сравнении с эталоном Фабри–Перо; найдены причины ограничений в увеличении числа траекторий. Расчетом показано, что достижимы рекордные значения разрешающей способности светофильтра; получены предварительные экспериментальные результаты, подтверждающие достижимость расчетных характеристик.

Разработанное устройство может найти применение в качестве узкополосного анализатора спектров лазерных излучателей; благодаря малым потерям в зеркалах полного внутреннего отражения оптический резонатор может быть использован при создании лазеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Visible lasers with subhertz linewidths / V.C. Young, F.C. Cruz, W.M. Itano, J.C. Bergquist // *Physical Review Letters*. – 1999. – Vol. 82, iss. 19. – P. 3799–3802.
2. **Розенберг Г.В.** Оптика тонкослойных покрытий. – М.: Физматлит, 1958. – 570 с.
3. **Борн М., Вольф Э.** Основы оптики. – М.: Наука, 1970. – 855 с.
4. **Ахманов С.А., Никитин С.Ю.** Физическая оптика: учебник. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. – 656 с.
5. **Кард П.Г.** Анализ и синтез многослойных интерференционных пленок. – Таллин: Валгус, 1971. – 233 с.
6. **Иогансен Л.В.** Резонансная дифракция волн в слоисто-неоднородных средах // *ЖЭТФ*. – 1961. – Т. 40, вып. 6. – С. 1838–1843.
7. **Иогансен Л.В.** Теория резонансных электромагнитных систем с полным внутренним отражением // *ЖТФ*. – 1962. – Т. 32, вып. 4. – С. 406–418.
8. **Иогансен Л.В., Глобенко Ю.В.** Теория резонансных слоисто-неоднородных сред электромагнитных систем с полным внутренним отражением // *Известия вузов. Радиофизика*. – 1976. – Т. 19, № 2.
9. **Скоков И.В.** Многолучевые интерферометры в измерительной технике. – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.
10. **Сырнева А.С.** Краевой эффект в фильтрах терагерцового диапазона, использующих нарушенное полное внутреннее отражение // *ГЕО-Сибирь–2010: сборник материалов VII Международного научного конгресса*. – Новосибирск, 2010. – Т. 5, ч. 2. – С. 95–99.
11. **Чесноков В.В., Сырнева А.С., Чесноков Д.В.** Оптические резонаторы полного внутреннего отражения с бегущей волной // *Материалы X Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения»: АПЭП–2010, 22–24 сентября 2010 г.*: в 7 т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – Т. 7. – С. 95–97.
12. **Чесноков В.В., Сырнева А.С., Чесноков Д.В.** Разработка модели интерференционного фильтра на основе полного внутреннего отражения // *Автометрия*. – 2015. – Т. 51, № 2. – С. 119–127.
13. Патент 2455669 С1, Российская Федерация, МПК G 02 B 5/00, G 02 F 1/01, H 01 S 3/08. Оптический резонатор / В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков, А.С. Сырнева; патентообладатель Сибирская государственная геодезическая академия; заявл. 21.10.2010; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 19.
14. **Сырнева А.С., Райхерт В.А.** Оптический резонатор полного внутреннего отражения с возможностью компенсации угловых положений его граней // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь–2010: X Международный конгресс и выставка. СибОптика–2014: международная научная конференция: сборник материалов: в 2 т.* – Новосибирск: СГГА, 2010. – Т. 2. – С. 113–116.
15. **Терентьев В.С.** Численное моделирование волоконного отражательного дифракционного интерферометра // *Автометрия*. – 2012. – № 4. – С. 41–54.
16. **Голдина Н.Д.** Расчет коэффициента отражения металл-диэлектрических структур при нарушенном полном внутреннем отражении // *Автометрия*. – 2009. – № 12. – С. 99–104.
17. Патент 1265678 А1, СССР. Интерференционный фильтр полного внутреннего отражения / Г.Б. Шоломицкий; заявл. 11.06.1985; опубл. 23.10.1986, Бюл. № 39.

**STUDY OF THE OPTICAL RESONATOR
WITH TOTAL INTERNAL REFLECTION MIRRORS**

Syrneva A.S., Chesnokov V.V.

*Siberian State University of Geosystems and Technologies,
Novosibirsk, Russian Federation*

Optical systems with total internal reflection (TIR) mirrors which provide a significant optical loss reduction in optical devices attract the attention of researchers. Repeated attempts to create multipath interference filters with a layered structure containing TIR mirrors have been made, but

they failed to achieve the expected reduction in optical losses. In works [6 – 8] the explanation is found in the existence of resonance wave diffraction wave in layered TIR systems, which leads to the need to increase the transverse dimensions of such layered systems as a normal-size wave propagates at not a zero angle of incidence in the structure and quickly leaves the optical aperture of the device in the direction transverse to the incident radiation. In the present paper, a cubic optical resonator with TIR mirrors in which a wave entering the cavity also propagates in the transverse direction due to an oblique incidence on the face of the cube, but its trajectory is «looped», which causes the wave to repeatedly return to the area of the optical aperture and to increase the transparency of the optical resonator. The article presents preliminary theoretical results of an experimental study of the developed cubic optical traveling wave resonator. A cavity cube having a side of 10 mm is made of glass K8, with the quality polishing quality corresponding to approximately 1 – 2 interferential bands and with the angle error between the faces being of the order of several seconds of arc. The input of helium-neon laser radiation into the resonator and its output from the cavity is carried out by a conventional method of radiation input into planar waveguides, i.e. by pressing optical prisms against the surface face of the cube. In this case, the wave tunnels through the air gap between the surfaces and faces of the prism. It is shown that, unlike the Fabry–Perot etalon, values of angular dispersion of the interferential filter with an optical resonator in the sagittal and meridional planes significantly differ. According to calculations the absence of optical losses on the TIR mirrors increases the number of effective full closed trajectories in the cavity up to 800 – 1000, which is an order of magnitude larger than in the etalon with metallic mirrors. The results obtained confirm that the use of full-reflecting cube faces as mirrors causes significantly smaller optical losses in the resonator compared with the Fabry–Perot etalons with metallic mirrors. The existence of anisotropy of filter angular dispersion is also revealed. The use of optical resonators with total internal reflection faces as narrow-band optical filters suitable for studying spectra of laser emitters as well as for developing powerful miniature solid-state lasers with a high optical strength of an output mirror is also discussed in the paper.

Keywords: optical resonator; the Fabry–Perot Etalon; total internal reflection; multipath interference; narrowband filtering; optical aperture; optical tunneling; optical prisms; resonant diffraction; light wave.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-4-118-127

REFERENCES

1. Young B.C., Cruz F.C., Itano W.M., Bergquist J.C. Visible lasers with subhertz linewidths. *Physical Review Letters*, 1999, vol. 82, iss. 19, pp. 3799–3802.
2. Rozenberg G.V. *Optika tonkosloinykh pokrytii* [Optics of thin-layer coatings]. Moscow, Fizmatlit Publ., 1958. 570 p.
3. Born M., Wolf E. *Principles of optics*. Oxford, New York, Pergamon Press, 1968. 808 p. (Russ. ed.: Born M., Vol'f E. *Osnovy optiki*. Moscow, Nauka Publ., 1970. 855 p.).
4. Akhmanov S.A., Nikitin S.Yu. *Fizicheskaya optika* [Physical optics]. Moscow, MSU Publ., 1998. 656 p.
5. Kard P.G. *Analiz i sintez mnogosloinykh interferentsionnykh plenok* [Analysis and synthesis of multi-layer interference films]. Tallin, Valgus Publ., 1971. 233 p.
6. Iogansen L.V. Rezonansnaya difraktsiya voln v sloisto-neodnorodnykh sredakh [Resonant diffraction of waves in a layered inhomogeneous media]. *Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki – Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1961, vol. 40, iss. 6, pp. 1838–1843. (In Russian)
7. Iogansen L.V. Teoriya rezonansnykh elektromagnitnykh sistem s polnym vnutrennim otrazheniem [Theory of resonant electromagnetic systems with total internal reflection]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki – Soviet Physics: Technical Physics*, 1962, vol. 32, iss. 4, pp. 406–418. (In Russian)
8. Iogansen L.V., Globenko Yu.V. Teoriya rezonansnykh sloisto-neodnorodnykh sred elektromagnitnykh sistem s polnym vnutrennim otrazheniem [Theory of resonant layered inhomogeneous media electromagnetic systems with total internal reflection. *Izvestiya vuzov. Radiophysica*]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Radiofizika – Radiophysics and Quantum Electronics*, 1976, vol. 19, no. 2. (In Russian)
9. Skokov I.V. *Mnogoluchevye interferometry v izmeritel'noi tekhnike* [Multibeam interferometers in measuring technique]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 256 p.
10. Syrneva A.S. [Regional effect in of terahertz radiation filters using the effect of broken total internal reflection]. *GEO-Sibir'-2010: sbornik materialov VII Mezhdunarodnogo kongressa* [GEO-Siberia-2010: The collection of materials of the VII International Congress]. Novosibirsk, 2010, vol. 5, pt. 2, pp. 95–99. (In Russian)

11. Chesnokov V.V., Syrneva A.S., Chesnokov D.V. [Optical resonators total internal atrogenes traveling wave]. *Materialy X Mezhdunarodnoi konferentsii "Aktual'nye problemy elektron-nogo priborostroeniya"*, APEP–2010. V 7 t. [Proceedings of 10th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE–2010). In 7 vol.]. Novosibirsk, 22–24 September 2010, vol. 7, pp. 95–97.
12. Chesnokov V.V., Syrneva A.S., Chesnokov D.V. Razrabotka modeli interferentsionnogo fil'tra na osnove polnogo vnutrennego otrazheniya [Development of a model of the interference filter on the basis of total internal reflection]. *Avtometriya – Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2015, vol. 51, no. 2, pp. 119–127. (In Russian)
13. Chesnokov V.V., Chesnokov D.V., Syrneva A.S. *Opticheskii rezonator* [Optical resonator]. Patent RF, no. 2455669, 2012.
14. Syrneva A.S., Reichert V.A. [Optical resonator of total internal reflection with the possibility of compensation of angular positions of its faces]. *Interexpo GEO-Sibir'–2010: X Mezhdunarodnyi kongress i vystavka. SibOptika–2014: mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya: sbornik materialov* [Interexpo GEO-Siberia 2010: X International Congress and Exhibition. SibOptika 2014: International Conference: a collection of materials]. Novosibirsk, 2010, vol. 2, pp. 113–116.
15. Terent'ev V.S. Chislennoe modelirovanie volokonnoego otrazhatel'nogo difraktsionnogo interferometra [Numerical simulation of fiber reflective diffraction interferometer]. *Avtometriya – Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2012, no. 4, pp. 41–54. (In Russian)
16. Goldina N.D. Raschet koeffitsienta otrazheniya metall-dielektricheskikh struktur pri narushennom polnom vnutrennem otrazhenii [The calculation of the reflection coefficient of the metal-dielectric structures in frustrated total internal reflection]. *Avtometriya – Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2009, no. 12, pp. 99–104. (In Russian)
17. Sholomitskii G.B. *Interferentsionnyi fil'tr polnogo vnutrennego otrazheniya* [Interference filter total internal reflection]. Patent USSR, no. 1265678, 1986.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Сырнева Александра Сергеевна – родилась в 1983 году, магистр. Основное направление научных исследований – оптические интерферометры и резонаторы, имеет 16 статей и 2 патента. (Россия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, старший преподаватель кафедры физики, тел. (383)361-08-36, 8-913-954-36-02. E-mail: aleksandra-syrneva@yandex.ru).

Syrneva Aleksandra Sergeevna (b. 1983) – master. The main direction of research-optical interferometers and resonators, has 16 articles and 2 patents (Russia, 630108 Novosibirsk, ul. Plahotnogo, 10, superior lecturer of the Department of physics, phone: (383)361-08-36, 8-913-954-36-02. E-mail: aleksandra-syrneva@yandex.ru).



Чесноков Владимир Владимирович – родился в 1938, д-р техн. наук, профессор. Основное направление научных исследований – взаимодействие лазерного излучения с веществом, лазерные микротехнологии и технологии и устройства микросистемной техники, имеет более 180 публикаций, в том числе 2 монографии и 50 патентов; чл.-корр. САН ВШ.

Chesnokov Vladimir Vladimirovich (b. 1938) – doctor of technical Sciences, Professor. The main direction of research – interaction of laser radiation with matter, laser microtechnology and technology devices and Microsystems engineering, has more than 180 publications, including 2 monographs and 50 patents; member. – Corr. SAN HS.

*Статья поступила 07 октября 2015 г.
Received October 07, 2015*

To Reference:

Syrneva A.S., Chesnokov V.V. Issledovanie opticheskogo rezonatora s zerkalami polnogo vnutrennego otrazheniya [Study of the optical resonator with total internal reflection mirrors]. *Doklady Akademii Nauk Vysshei Shkoly Rossiiskoi Federatsii –Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2015, no. 4(29), pp. 118–127.