

ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ РЕЗОНАТОР ФАБРИ – ПЕРО

В.М. Кравченко, А.С. Кузьмицкая, В.В. Малютин-Бронская, А.И. Конойко

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск

TUNABLE FABRY – PEROT RESONATOR

V.M. Kravchenko, H.S. Kuzmitskaya, V.V. Malyutina-Bronskaya, A.I. Konoiko

SSPA “Optics, Optoelectronics and Laser Technology”, Minsk

Аннотация. Представлены структура и параметры экспериментального образца перестраиваемого резонатора Фабри – Перо, работающего на принципе термооптического эффекта для его применения в качестве узкополосного светофильтра с перестраиваемой полосой пропускания. Особенность данного устройства заключается в интеграции нагревательного элемента и резонатора Фабри – Перо в единую конструкцию. Экспериментально установлено, что с ростом тока, проходящего через управляющий нагревательный элемент, происходит нагрев структуры резонатора, приводящий к смещению максимума коэффициента пропускания в более коротковолновую область светового спектра.

Ключевые слова: перестраиваемый резонатор, Фабри – Перо, термооптический эффект, база резонатора.

Для цитирования: Перестраиваемый резонатор Фабри – Перо / В.М. Кравченко, А.С. Кузьмицкая, В.В. Малютин-Бронская, А.И. Конойко // Проблемы физики, математики и техники. – 2025. – № 3 (64). – С. 62–66. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2025_3_64_62. – EDN: KUAOZX

Abstract. The structure and parameters of an experimental sample of a tunable Fabry – Perot resonator operating on the principle of the thermo-optical effect are presented for its use as a narrow-band light filter with a tunable bandwidth. The peculiarity of this device is the integration of a heating element and a Fabry – Perot resonator into a single structure. It has been experimentally established that with an increase in the current passing through the control heating element, the resonator structure heats up, leading to a shift in the maximum transmission coefficient to a shorter-wave region of the light spectrum.

Keywords: tunable resonator, Fabry – Perot, thermo-optic effect, resonator base.

For citation: Tunable Fabry – Perot resonator / V.M. Kravchenko, H.S. Kuzmitskaya, V.V. Malyutina-Bronskaya, A.I. Konoiko // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2025. – № 3 (64). – P. 62–66. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2025_3_64_62 (in Russian). – EDN: KUAOZX

Введение

Интерференционные светофильтры обладают высоким спектральным разрешением, благодаря чему активно применяются в различных научных исследованиях, измерительной технике, промышленности и многих других областях [1]. К преимуществам тонкопленочных оптических фильтров относятся их компактность, простота и возможность конструирования под определенные задачи. Тонкопленочные оптические фильтры выполняются в виде одно- или многослойных структур. Достоинством последних являются более резкие границы спектральной характеристики.

В светофильтрах на основе резонатора Фабри – Перо перестройка по спектру осуществляется за счет изменения оптической базы (зазора) между зеркалами резонатора Фабри – Перо, которое соответствует первому порядку интерференции в видимом диапазоне спектра [2]. Изменение базы резонатора может осуществляться как за счет электромеханического (изменение размера базы резонатора под действием управляющего напряжения), так и термооптического эффекта (изменение оптических характеристик материалов под действием температуры) [3], [4].

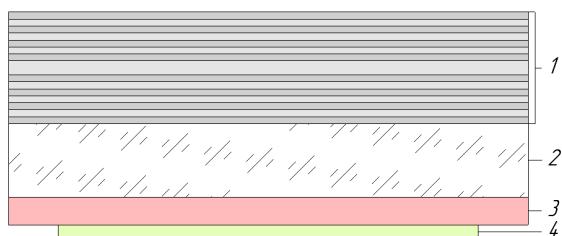
Цель работы заключается в разработке перестраиваемого резонатора Фабри – Перо на базе термооптического эффекта, где перестройка резонатора осуществляется за счёт изменения силы тока, протекающего через нагревательный элемент [3].

1 Методы исследования

Структура перестраиваемого резонатора Фабри – Перо представлена на рисунке 1.1. Она представляет собой конструкцию, в которую входит как резонатор Фабри – Перо, так и управляющий нагревательный элемент. Для предотвращения влияния оптических свойств нагревательного элемента на интерференционную картину резонатора, данные элементы должны быть нанесены на разные стороны стеклянной подложки. Кроме того, для увеличения коэффициента пропускания нагревательного элемента на него наносится просветляющий слой.

Резонатор Фабри – Перо представляет собой многослойную интерференционную $H-L$ структуру из двух оптических материалов с различным показателем преломления, где H – материал с высоким показателем преломления, а L – материал

с низким показателем преломления. Для получения эффекта интерференции с низкими потерями должно выполняться условие фазового согласования слоев H и L в виде $H = L^2$. Согласно литературным источникам [5]–[8] оптимальной является комбинация материалов ниобий (V) оксид для слоя H и кремний (IV) оксид для слоя L (показатели преломления от 2,2 до 2,4 и 1,46 соответственно). В качестве материала подложки могут быть использованы промышленно выпускаемые оптические стекла с коэффициентом преломления от 1,51 до 1,52 [5]. Для нагревательного элемента нами предложена прозрачная пленка ИТО (смесь In_2O_3 и SnO_2 в соотношении 9 : 1) [10]–[13], которая обладает высокой электропроводностью и оптической прозрачностью в видимом диапазоне спектра. Для просветляющего слоя требуется материал с коэффициентом преломления не более чем 1,38, чему соответствует фтористый магний MgF_2 [5]–[6].



1 – интерферометр Фабри – Перо, 2 – подложка;
3 – оптический прозрачный нагревательный элемент, 4 – просветляющий слой

Рисунок 1.1 – Структура перестраиваемого резонатора Фабри – Перо

Процесс изготовления экспериментального образца перестраиваемого резонатора Фабри – Перо можно разделить на два этапа: формирование самой структуры перестраиваемого резонатора и процесс герметизации. В виду того, что температура испарения оксидов металлов составляет от 1500 до 2600 °С, то для получения тонких пленок может быть применен метод электронно-лучевого напыления [13]–[15]. Для процесса напыления были использованы промышленно выпускаемые таблетки индий (III) – олово (IV) оксид, ниобий (V) оксид и кремний (IV) оксид размером $d = 22$ мм, $h = 9$ мм [8]. Контроль процесса осаждения тонких пленок осуществлялся с помощью оптического метода контроля, что дает возможность формировать высококачественные тонкие пленки толщиной от 40 нм различных материалов с высокой точностью в 1 нм, что повышает воспроизводимость результатов. Также для контроля скорости осаждения были применены кварцевые микровесы. Толщина нагревательного элемента на базе пленки ИТО составила 82,40 нм. Толщины слоев резонатора Фабри – Перо определяются как $\lambda / 4$, где λ –

центральная длина волны полосы пропускания, и составляют 130 нм.

Внешний вид экспериментальных образцов перестраиваемых резонаторов Фабри – Перо в оснастке внутри вакуумной камеры установки напыления, сформированных на пластине из стекла К8 диаметром 76 мм, показаны на рисунке 1.2.

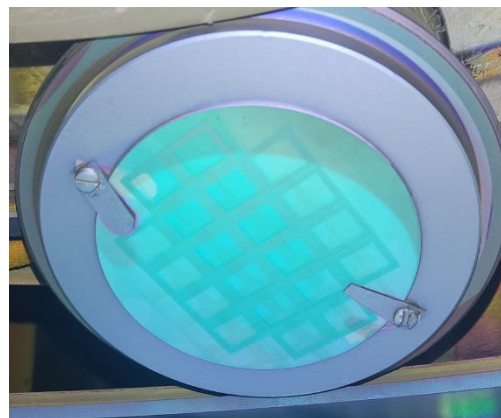


Рисунок 1.2 – Внешний вид экспериментальных образцов перестраиваемых резонаторов Фабри – Перо в оснастке внутри вакуумной камеры

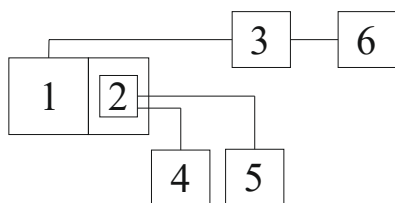
Для проведения дальнейших измерений подложка с экспериментальными образцами перестраиваемых резонаторов Фабри – Перо была разделена на отдельные элементы размером 25×75 мм на установке монтажа пластин ЭМ-2048А и установке разделения сверхтонких пластин ЭМ-2085В.

Для определения характеристик перестраиваемого резонатора Фабри – Перо исследовались его оптические характеристики при изменении температуры. Изменение температуры резонатора Фабри – Перо осуществлялось за счет протекания постоянного электрического тока через оптически прозрачный тонкопленочный нагревательный элемент (тонкая пленка ИТО), находящийся на той же подложке, что и сам резонатор. Для предотвращения влияния оптических свойств нагревательного элемента на интерференционную картину резонатора данные элементы должны быть нанесены на разные стороны стеклянной подложки.

Для проведения измерений влияния электрического тока на температуру и оптические характеристики экспериментального образца перестраиваемого резонатора Фабри – Перо был собран измерительный стенд, структура которого показана на рисунке 1.3.

Экспериментальный образец перестраиваемого резонатора Фабри – Перо с подключенными к нему контактами источника постоянного тока помещается в камеру спектрофотометра PHOTON RT [16]. Также в камеру помещается оптический пирометр для отслеживания изменения

температуры под действием тока. В качестве источника электрического тока применялся калибратор-измеритель напряжения и тока Keithley 2450, для контроля тока был использован мультиметр универсальный GW Instek GDM-8245. Значение силы тока изменялось с шагом 0,01 А до увеличения температуры экспериментального образца на 10 °С.



1 – multifunctional two-beam scanning spectrophotometer PHOTON RT,
 2 – cell with experimental sample of reconfigurable Fabry – Perot resonator,
 3 – personal computer (PC) with installed software,
 4 – power source of the heating element of the thermocell,
 5 – optical pyrometer OPTRIS CT (8 μm),
 6 – printer

Рисунок 1.3 – Структурная схема стенда для измерения параметров спектров пропускания термооптических преобразователей на базе микрорезонаторов Фабри – Перо

2 Результаты и их обсуждение

Изготовленные пленки нагревательного элемента на базе ИТО обладают прозрачностью в видимом диапазоне длин волн (рисунок 2.1) и сопротивлением 40 Ом.

Измерены спектры пропускания тонкой пленки ИТО на стеклянной подложке К8 в диапазоне длин волн от 400 нм до 700 нм. Установлено,

что экстремум функции пропускания пленки ИТО соответствует длине волны $\lambda = 592$ нм. Результаты измерения спектра пропускания пленки ИТО под воздействием электрического тока в диапазоне от 0 до 700 мА представлены в таблице 2.1. Экспериментально установлено, что с ростом тока от 0 до 700 мА, протекающего в тонкой пленке ИТО, произошло смещение минимума функции спектра пропускания в более коротковолновую область от 592 нм до 579 нм ($\Delta\lambda = 13$ нм), при этом коэффициент пропускания уменьшился на 0,92%.

Таблица 2.1 – Экстремум (минимум) спектра пропускания под воздействием тока

№ измерения	Значение тока, мА	Плотность тока, А/см ²	Коэффициент пропускания, %	Длина волны, нм
1	0	0,00	54,59	592
2	50	2427,18	54,56	592
3	100	4854,37	54,56	592
4	120	5825,24	54,55	592
5	190	9223,30	54,53	591
6	300	14563,11	54,41	589
7	400	19417,48	54,28	588
8	500	24271,84	54,12	587
9	600	29126,21	53,92	583
10	700	33980,58	53,67	579

С помощью оптического пирометра OPTRIS CT была установлена зависимость температуры экспериментального образца перестраиваемого резонатора Фабри – Перо от значения тока, подаваемого на нагревательный элемент ИТО (рисунок 2.2). На рисунке 2.3 представлены спектры пропускания перестраиваемого резонатора Фабри – Перо под воздействием электрического тока и температуры.

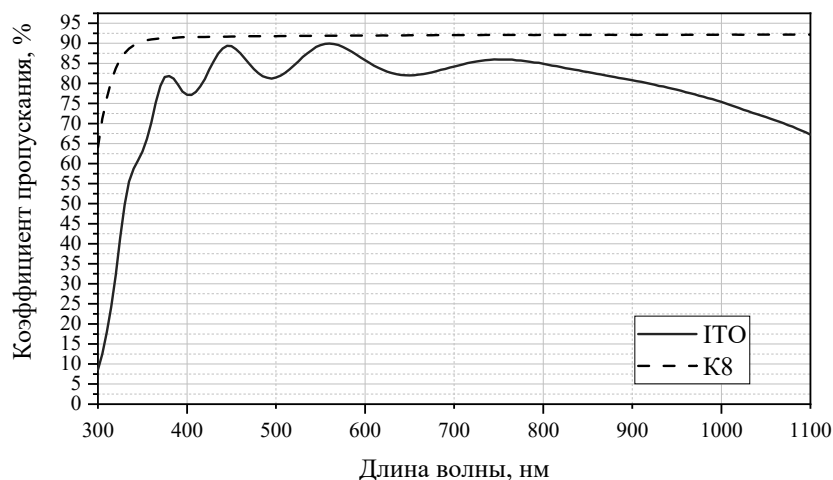


Рисунок 2.1 – Спектр пропускания стеклянной подложки К8 и тонкой пленки ИТО на стеклянной подложке К8

Таблица 2.2 – Результаты измерений

Ток, А	Плотность тока, А/см ²	Температура, °С	Коэффициент пропускания, %	Длина волны, нм	$\Delta\lambda$, нм	ΔT , %
0,00	0,00	28,3	59,71	532,00	—	0
0,24	11650,49	38,3	53,76	513,00	19,00	5,95
0,32	15533,98	48,3	52,19	509,00	4,00	1,57
0,39	18932,04	58,3	50,71	507,50	1,50	1,48
0,44	21359,22	68,3	47,57	506,50	1,00	3,14

В таблице 2.2 представлены результаты измерений максимального значения коэффициента пропускания перестраиваемого резонатора Фабри – Перо и соответствующей ему длины волны в зависимости от величины подаваемого тока на нагревательный элемент и соответственно его температуры.

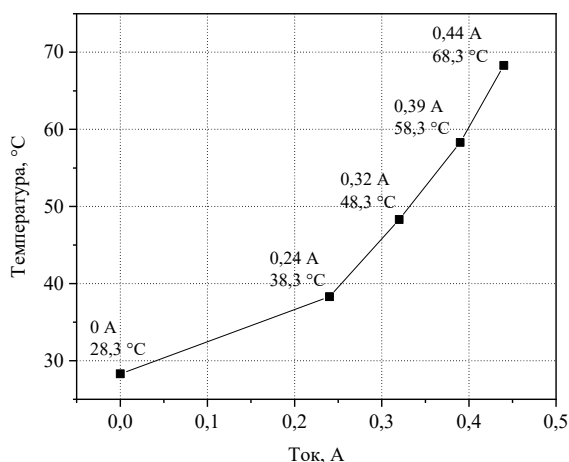


Рисунок 2.2 – Зависимость температуры измеряемого образца от протекаемого электрического тока

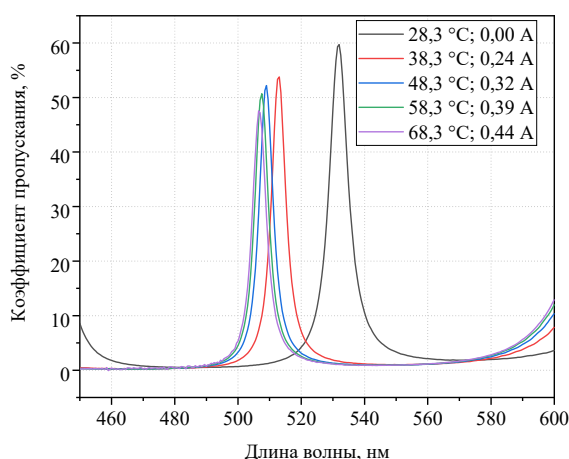


Рисунок 2.3 – Спектры пропускания перестраиваемого резонатора Фабри – Перо под воздействием электрического тока и температуры

Из рисунков 2.2 и 2.3 и таблицы 2.2 установлено, что с ростом силы тока от 0 до 0,44 А, протекающего в тонкой пленке ИТО, произошел нагрев экспериментального образца от 28,3 °С до 68,3 °С, что привело к смещению максимума коэффициента пропускания в более коротковолновую область светового спектра от 532,00 нм до 506,50 нм (смещение 25,5 нм), при этом максимум коэффициента пропускания уменьшился с 59,71% до 47,57% (смещение 12,14%). Также из рисунка 2.3 видно, что на выходе перестраиваемого резонатора Фабри – Перо наблюдается узкополосное излучение, полуширина которого составляет около 7 нм, при нагреве полуширина становится около 5,5 нм.

Для исследования временной стабильности характеристик перестраиваемого образца Фабри – Перо его помещали на хранение в вакуумную камеру на срок 268 дней. Для проверки работоспособности образца после хранения в вакууме были сняты спектры пропускания при комнатной температуре и после нагрева на 20 °С. Установлено, что при нагреве происходит сдвиг функции пропускания в более коротковолновую область спектра, что свидетельствует о работоспособности экспериментального образца.

Таким образом, перестраиваемый резонатор Фабри – Перо, работающий на принципе термооптического эффекта, может применяться в качестве узкополосного светофильтра с перестраиваемой полосой пропускания.

Заключение

Разработана структура и изготовлены методом электронно-лучевого напыления экспериментальные образцы перестраиваемого резонатора Фабри – Перо со встроенным нагревательным элементом на базе пленки ИТО.

Исследование оптических, термо- и электрооптических характеристик экспериментального образца перестраиваемого резонатора Фабри – Перо показали, что с ростом силы тока от 0 до 0,44 А, протекающего в тонкой пленке ИТО, происходит нагрев экспериментального образца от 28,3 °С до 68,3 °С, что приводит к смещению максимума коэффициента пропускания в более коротковолновую область светового спектра на 25,5 нм. Исследование временной стабильности характеристик экспериментального образца

показали, что спустя 268 дней хранения в вакууме работоспособность устройства сохраняется.

Данное устройство можно использовать в качестве узкополосного светофильтра с перестраиваемой полосой пропускания для монохроматизации оптического излучения видимого диапазона длин волн, полуширина которого составляет порядка 7 нм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алмазбеков, К.А. Перестраиваемые оптические фильтры на тонких пленках / К.А. Алмазбеков, А.Г. Козырев // *Аллея науки*. – 2018. – Т. 4, № 6 (22). – С. 592–596.
2. Чесноков, В.В. Интерференционные светофильтры с перестраиваемой полосой пропускания / В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков, Д.М. Никулин // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. – 2009. – Т. 52, № 6. – С. 63–68.
3. Чесноков, А.Е. Исследование оптических характеристик многослойных структур управляемого резонатора Фабри – Перо / А.Е. Чесноков // *ГЕО-СИБИРЬ*. – 2010. – Т. 5, № 2. – С. 27–31.
4. Никулин, Д.М. Термостабильность перестраиваемых светофильтров на основе резонатора Фабри – Перо / Д.М. Никулин // *ГЕО-СИБИРЬ*. – 2007. – Т. 3. – Ч. 1. – С. 167–170.
5. Weber, M.J. Handbook of Optical Materials / M.J. Weber // Boca Raton: CRC Press LLC, 2003. – 499 p.
6. *Оптические материалы для инфракрасной техники*. Справочное пособие / Е.М. Воронкова [и др.]. – Москва: Наука, 1965. – 337 с.
7. *Composite Materials Handbook*. Volume 3: Materials Usage, Design, and Analysis. – Warrendale: SAE International, 2002. – 693 p.
8. ЗАО «НПФ „Люминофор“». Сайт производителя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://luminophor.ru/>. – Дата доступа: 09.06.2023.
9. Немилов, С.В. Оптическое материаловедение: Оптические стекла: учебное пособие, курс лекций / С.В. Немилов. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. – 175 с.
10. Прозрачные проводящие покрытия на основе алюминиевой решетки, встроенной в анодный оксид алюминия / А.В. Долбик [и др.] // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сборник научных трудов*.

В 2 кн. Кн. 1: *Материаловедение / Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси*; редкол.: В.Г. Залесский [и др.]. – Минск, 2022. – С. 83–90.

11. Патрушева, Т.Н. Технологии изготовления компонентов оксидных солнечных батарей: монография / Т.Н. Патрушева. – Красноярск: СФУ, 2015. – 328 с.

12. Мельников, А.А. Прозрачные электропроводящие антиотражающие покрытия на основе ИТО, SiO₂, TiO₂ / А.А. Мельников, П.А. Щур // *Труды ВИАМ*. – 2019. – Т. 80, № 8. – С. 56–66.

13. Троян, П.Е. Прозрачные электропроводящие покрытия с чувствительными значениями коэффициента пропускания и возбуждения сопротивления / П.Е. Троян, Ю.В. Сахаров, Ю.С. Жидик // *Труды ТУРСа*. – 2014. – Т. 31, № 1. – С. 99–120.

14. *Справочник технолога-оптика*. 2-е изд. / М.А. Окатов, Э.А. Антонов. – Санкт-Петербург: Политехника, 2004. – 679 с.

15. Ершов, А.В. Многослойные оптические покрытия. Проектирование, материалы, особенности технологии получения методом электронно-лучевого испарения: Учебно-методические материалы по программе повышения квалификации «Новые материалы электроники и оптоэлектроники для информационно-телекоммуникационных систем» / А.В. Ершов, А.И. Машин. – Нижний Новгород: ННГУ, 2006. – 105 с.

17. *ЭссентОптика*. Сайт производителя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.essentoptics.com/>. – Дата доступа: 08.12.2023.

Авторы выражают благодарность Белорусскому республиканскому фонду фундаментальных исследований за финансирование данной работы (проект Ф23МЭ-011).

Поступила в редакцию 03.04.2025.

Информация об авторах

Кравченко Владимир Михайлович – к.т.н.
Кузьмицкая Анна Сергеевна – научный сотрудник
Малютина-Бронская Виктория Владимировна – зав. лабораторией
Конайко Алексей Иванович – к.ф.-м.н., доцент