

## ФАЗОВО-ИЗОТРОПНЫЙ УГОЛКОВЫЙ ОТРАЖАТЕЛЬ ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

А.С. Никитин, А.Н. Борисов

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

drnikitin@rambler.ru ,dokbore@yandex.ru

**Резюме:** Работа посвящена разработке оптического устройства – фазово-изотропного уголкового отражателя, который может найти применение в качестве зеркала в волоконно-оптических преобразователях. Применение фазово-изотропных элементов позволяет уменьшить влияние набега фазы светового сигнала при отражении от зеркала, установленного в конце волоконного датчика. В работе проведен анализ существующих фазовых устройств и предложено устройство, использующее реальные пленкообразующие материалы, угол падения излучения и материалы призмы.

**Ключевые слова:** волоконно-оптический преобразователь, зеркало, уголкового отражателя, интерференционное диэлектрическое покрытие, показатель преломления, коэффициент отражения, фазовая анизотропия, поляризация излучения.

**DOI:**10.30724/1998-9903-2018-20-5-6-110-117

## PHASE-ISOTROPIC CORNER REFLECTOR FOR FIBER-OPTIC CONVERTER.

A.S. Nikitin, A.N. Borisov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

drnikitin@rambler.ru ,dokbore@yandex.ru

**Abstract:** The article is devoted to the design of optical device – phase isotropic corner reflector, which may find application as a mirror in the fiber-optic converter. The use of phase-isotropic elements will reduce the effect of a light signal phase shift on reflection from the mirror mounted on the end of the fiber sensor. The work analyzes the existing phase devices and suggests a device using real film-forming materials, the angle of incidence of radiation, and the materials of the prism.

**Keywords:** Fiber-optic converter, a corner reflector, dielectric interference coating, refractive index, reflectance, phase anisotropy, polarization of the radiation.

Работа волоконно-оптического преобразователя тока основана на бесконтактном оптическом методе измерения электрического тока. Метод использует магнитооптический эффект Фарадея в кварцевом волоконном световоде. Принцип работы ВОПТ заключается в следующем. Две световые волны с ортогональными циркулярными поляризациями вводятся в многовитковый контур из специального световода, внутри контура находится проводник с током. Если тока в проводнике нет, световые волны распространяются по волоконному контуру с одинаковой фазовой скоростью и на выход контура приходят с нулевой относительной разностью фаз. При наличии в проводнике электрического тока световод оказывается в продольном магнитном поле протекающего тока. При этом

оптические свойства световода изменяются, и скорость распространения световых волн по контуру становится разной.

Таким образом, задача измерения тока волоконно-оптическим методом сводится к прецизионному измерению относительного фазового сдвига между световыми волнами  $\varphi_F$  в волоконном чувствительном контуре, находящемся в продольном магнитном поле электрического тока. Измерение фазовых сдвигов с высокой точностью можно реализовать, используя методы волоконно-оптической интерферометрии [1].

Основным признаком взаимного волоконного интерферометра является наличие малой разности оптических путей интерферирующих волн. Идеальным взаимным интерферометром является интерферометр с нулевой разностью оптических путей для рабочих световых волн. Такому условию удовлетворяют кольцевые интерферометры Саньяка и линейные отражательные интерферометры на ортогональных поляризационных модах. Оба названных интерферометра можно использовать для измерения фарадеевского фазового сдвига, индуцируемого магнитным полем электрического тока. В волоконных преобразователях тока чаще используется отражательный волоконный интерферометр. Схема подобного интерферометра показана на рис. 1.

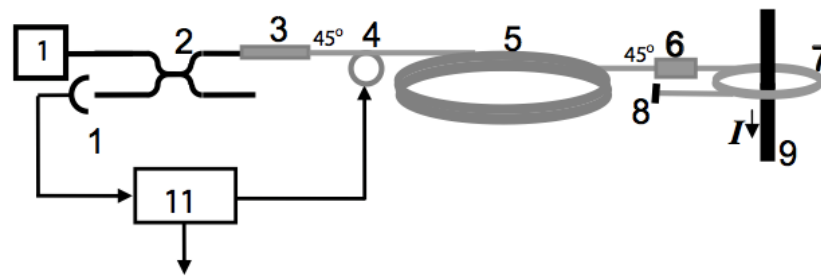


Рис. 1. Схема отражательного интерферометра.

В качестве источника излучения используется источник когерентного излучения 1. Излучение проходит через ответвитель 2 и попадает в волоконный поляризатор 3. Поляризатор возбуждает на входе волоконного пьезомодулятора 4 две линейно поляризованные световые волны равной интенсивности, но с ортогональными направлениями колебания вектора электрического поля ( $E_x$  и  $E_y$  моды). Пройдя модулятор, световые волны попадают в волоконную линию задержки 5, изготовленную из того же типа световода, что и модулятор. Далее линейно поляризованные моды с помощью четвертьволновой волоконной пластинки 6 конвертируются в ортогональные циркулярно поляризованные моды. Выход четвертьволновой пластинки соединен с волоконным контуром 7 на основе световода. Циркулярно поляризованные световые волны пробегают многовитковый контур в прямом направлении и, отражаясь от зеркала 8, распространяются в обратном направлении. При отражении лево-циркулярное состояние поляризации волны конвертируется в поляризационное состояние с правым вращением, и наоборот. Световые волны, распространяясь в обратном направлении, вновь проходят четвертьволновую пластинку, на выходе пластинки их поляризации конвертируются в линейные, но при этом волна, которая имела в прямом направлении  $x$  поляризацию, будет иметь при обратном распространении  $y$  поляризацию, и наоборот. В результате при отсутствии тока в пронизывающем чувствительный контур проводнике 9, оптический путь для обеих световых волн оказывается равным и волны на поляризатор 3 приходят с нулевой относительной фазой. Таким образом, имеем оптическую схему в которой компенсируются все взаимные фазовые сдвиги между световыми волнами, накопленные при их распространении в интерферометре. Однако зеркало 8 все же вносит свои коррективы в характеристики устройства, поскольку при отражении от любого зеркала имеют место изменения фазового состава излучения.

Данная работа посвящена разработке специального оптического устройства – фазово-изотропного уголкового отражателя, который с успехом может заменить зеркало, отмеченное позицией 8 на рис. 1, и повысить качество волоконно-оптических устройств, использующих в своей конструкции интерферометры и кольцевые оптические схемы.

В рассматриваемом нами оптическом устройстве в качестве зеркала применено так называемое «глухое» зеркало (непропускающее свет), причем чем выше коэффициент отражения таких зеркал, тем выше добротность резонатора. «Глухие» амплитудно- и фазово- изотропные зеркала (АФИЗ) обычно изготавливаются на основе традиционной зеркальной системы [2; 3]. Однако для обеспечения высокого (близкого к 1) коэффициента отражения требуется довольно большое число слоев. В связи с этим рассмотрим возможность конструирования АФИЗ на основе явления полного внутреннего отражения (ПВО). ПВО легко осуществить с помощью призмы. Действительно, если  $n$  – показатель преломления призмы, то при

$$\theta > \theta_{кр} = \arcsin(1/n) \quad (1)$$

на границе раздела отражающая грань призмы – воздух имеет место ПВО [4], то есть

$$R_s = R_p = 1. \quad (2)$$

Значение фазового сдвига между  $s$ - и  $p$ -компонентами изменяется с изменением  $\theta$ , причем сначала уменьшается от  $180^\circ$  (при  $\theta = \theta_{кр}$ ) до минимального значения:

$$\Delta_{\min} = 4\arcsin \operatorname{tg}(1/n) \quad (3)$$

при

$$\theta_{\min} = \arcsin((2/(1 + n^2))^{1/2}), \quad (4)$$

а затем возрастает до  $180^\circ$  (при  $\theta = 90^\circ$ ) [5]. Явление ПВО нередко используется для создания фазосдвигающих устройств (ФУ), обеспечивающих разность фазовых сдвигов для  $s$ - и  $p$ -поляризаций  $90^\circ$ . Из выражения (3) видно, что в случае использования одной границы раздела возможность получения  $\Delta = 90^\circ$  очень ограничена. Действительно, подставляя в (3)  $\Delta_{\min} = 90^\circ$ , найдем  $n = 2,414$  и  $\theta_{\min} = 32,8^\circ$ . Однако обычно применяемые для изготовления призм стекла, прозрачные в видимой области спектра, имеют показатель преломления  $\{1,45 - 1,8\}$ . Возможность достижения  $\Delta = 90^\circ$  при реальных значениях показателя преломления призмы, как показано в [6; 7], обеспечивается уже при нанесении одного слоя диэлектрика на грань призмы. Нанесение многослойных покрытий позволяет расширить спектральный диапазон, где выполняется это фазовое условие [8].

Призмённые уголкового отражатели, работающие на основе явления ПВО, также широко используются в качестве малорасстраивающих зеркал лазерных резонаторов [9]. При создании АФИЗ на основе явления ПВО, наряду с (2), необходимо обеспечить фазовую изотропию, т.е.  $\Delta = 0$ . Очевидно, что если  $\Delta = 90^\circ$ , как отмечалось выше, достигается при нанесении одного слоя на грань призмы, то достижение  $\Delta = 0$  может оказаться возможным при нанесении на грань призмы системы диэлектрических слоев. Такая возможность отмечалась в работе [10], однако детального исследования, позволяющего определять необходимое количество слоев при заданных показателях преломления слоев и призмы, проведено не было. Так, использование неправильного выражения для комплексного коэффициента отражения от системы диэлектрических слоев, нанесенных на грань призмы, привело автора работы к ошибочному выводу о необходимости использования большого количества слоев для достижения фазового сдвига, близкого к нулю. В настоящей работе эта задача решается методом эффективных границ.

Рассмотрим систему, состоящую из  $N$  слоев диэлектриков, расположенных на грани призмы. Разобьем эту систему на две подсистемы (I) и (II), разделенные слоем с номером  $m$  ( $m = 1, 2, \dots, N$ ). Нумерация слоев осуществляется от призмы к воздуху. Использование обобщенных формул Власова, полученных П.Г. Кардом [11], позволило нам получить следующее выражение для комплексного амплитудного коэффициента отражения этой системы:

$$\tilde{r} = \frac{\sqrt{\tilde{R}_1} \cdot \exp(i\tilde{\rho}_1) + \sqrt{\tilde{R}_2} \cdot \exp[i(\tilde{\rho}_2 + 2\tilde{\tau}_1 - 2\alpha_m)]}{1 + \sqrt{\tilde{R}_2 \tilde{R}_1} \cdot \exp[i(\tilde{\rho}_2 - \tilde{\rho}_1 + 2\tilde{\tau}_1 - 2\alpha_m)]}, \quad (5)$$

где  $\tilde{R}_1$ ,  $\tilde{R}_2$  – энергетические коэффициенты отражения подсистем (I) и (II);  $\tilde{\rho}_1$ ,  $\tilde{\rho}_2$  – соответствующие сдвиги фаз при отражении;  $\tilde{\tau}_1$  – сдвиг фазы при прохождении излучения через подсистему (I);  $\alpha_m$  – эффективная оптическая толщина слоя  $m$ , которую можно представить в виде

$$\alpha_m = (2\pi/\lambda)n_m d_m \cos \theta_m = g_m \varphi \cos \theta_m, \quad (6)$$

где  $g_m$  – оптическая толщина слоя  $m$  в долях  $\lambda_0/4$  ( $\lambda_0$  – контрольная длина волны);  $\varphi$  – относительная спектральная переменная;  $\theta_m = \arcsin(n \sin \theta / n_m)$  – угол преломления в слое  $m$ ;  $\theta$  – угол призмы.

Будем считать, что ПВО осуществляется только на границе последнего слоя с воздухом. Полагая в соответствии с этим  $\tilde{R}_2 = 1$ , после несложных преобразований получим из (5)

$$\tilde{r} = \exp \left[ i 2 \arctg \frac{\sqrt{\tilde{R}_1} \sin(\tilde{\rho}_1 + x/2) + \sin(x/2)}{\sqrt{\tilde{R}_1} \cos(\tilde{\rho}_1 - x/2) + \cos(x/2)} \right], \quad (7)$$

где

$$x = 2\alpha_m - \tilde{\rho}_2 - 2\tilde{\tau}_1. \quad (8)$$

Из (7) сразу получаем выражение для фазового сдвига при отражении от системы:

$$\tilde{\rho} = 2 \arctg \frac{\sqrt{\tilde{R}_1} \sin(\tilde{\rho}_1 + x/2) + \sin(x/2)}{\sqrt{\tilde{R}_1} \cos(\tilde{\rho}_1 - x/2) + \cos(x/2)}. \quad (9)$$

Значок « $\sim$ » в приведенных выражениях означает, что они верны как для  $s$ - так и для  $p$ -поляризации. В случае  $s$ -поляризации всем величинам, стоящим под значком « $\sim$ », следует приписать индекс  $s$  (например, вместо  $\tilde{R}_1$  будет  $R_1^s$ ), в случае  $p$ -поляризации – индекс  $p$ .

Решим теперь уравнение фазовой изотропии  $\rho_s = \rho_p$  относительно оптической толщины промежуточного слоя  $g_m$ . Для этого нужно приравнять в (9) выражения, стоящие под знаком  $\arctg$  для  $s$ - и  $p$ -поляризаций и решить полученное уравнение сначала относительно  $x$ , а затем, с учетом (6), (8), получить выражение для  $g_m$ . В результате ряда преобразований получаем следующее выражение:

$$g_m = \frac{\arctg z}{\varphi(1 - n^2 \sin^2 \theta / n_m^2)^{1/2}}, \quad (10)$$

где

$$z = \frac{N \pm (N^2 - 4ML)^{1/2}}{2M},$$

$$M = B^s D^p - B^p D^s,$$

$$N = A^s D^p - A^p D^s + B^s C^p - B^p C^s,$$

$$L = A^s C^p - A^p C^s,$$

в свою очередь,

$$\tilde{A} = \tilde{a} + \operatorname{tg} \tilde{\beta}, \quad \tilde{B} = 1 - \tilde{b},$$

$$\tilde{C} = 1 + \tilde{b}; \quad \tilde{D} = \tilde{a} - \operatorname{tg} \tilde{\beta},$$

и, наконец,

$$\tilde{a} = \sqrt{\tilde{R}_1} (\sin \tilde{\rho}_1 - \cos \tilde{\rho}_1 \cdot \operatorname{tg} \tilde{\beta}),$$

$$\tilde{\beta} = \frac{\tilde{\rho}_2}{2} + \tilde{\tau}_1.$$

При расчете величин  $\tilde{R}_1$ ,  $\tilde{\rho}_1$ ,  $\tilde{\tau}_1$  для подсистемы I следует учитывать, что исходной средой является призма, а подложкой – промежуточный слой. При расчете  $\tilde{\rho}_2$  для подсистемы II исходной средой является промежуточный слой, а подложкой – воздух.

Из (10) видно, что действительные значения  $g_m$  возможны при выполнении условия

$$\tilde{D} = N^2 - 4ML \geq 0. \quad (11)$$

Расчеты по выражениям (10), с учетом (11), должны проводиться для угла падения  $\theta$ , удовлетворяющего следующему неравенству:

$$\arcsin(1/n) < \theta < \arcsin(n_m/n). \quad (12)$$

Левая часть следует из требования наличия ПВО (1), а правая обеспечивает отсутствие ПВО внутри диэлектрических слоев покрытия.

При расчетах АФИЗ для лазерных резонаторов, как правило, конструктивным углом падения является  $\theta = 45^\circ$ . Нетрудно убедиться, что для практически используемых стекол и материалов слоев значение  $\theta = 45^\circ$  всегда удовлетворяет неравенству (12). Действительно, среди стекол, прозрачных в видимой области спектра, наибольшим показателем преломления ( $n = 1,8$ ) обладает стекло марки ТФ-10, а наименьшим – кварц ( $n = 1,45$ ). Среди материалов, используемых для производства тонкопленочных покрытий, наименьший показатель преломления имеет криолит ( $n = 1,33$ ). Подстановка этих значений в (12) приводит к неравенству, определяющему минимально возможный интервал для углов падения:

$$43,6^\circ < \theta < 47,6^\circ. \quad (13)$$

Как видно, угол  $\theta = 45^\circ$  попадает в этот интервал.

Анализ, проведенный с помощью выражений (10), (11), показал, что чем больше показатель преломления призмы и чем больше разница показателей преломления пары слоев с высоким и низким показателями преломления, тем меньшее количество слоев требуется для достижения фазовой изотропии при заданном  $\theta$ , удовлетворяющем неравенству (12). При использовании одного слоя (для  $\theta = 45^\circ$ ), даже если призма выполнена из стекла с максимально возможным показателем преломления, добиться выполнения условия  $\Delta = 0$  можно только при использовании слоев с очень большими показателями преломления ( $n_1 > 6$ ). Это следует из зависимости  $\tilde{D}(n_1)$ , рассчитанной по выражению (11) и показанной на рис. 2.

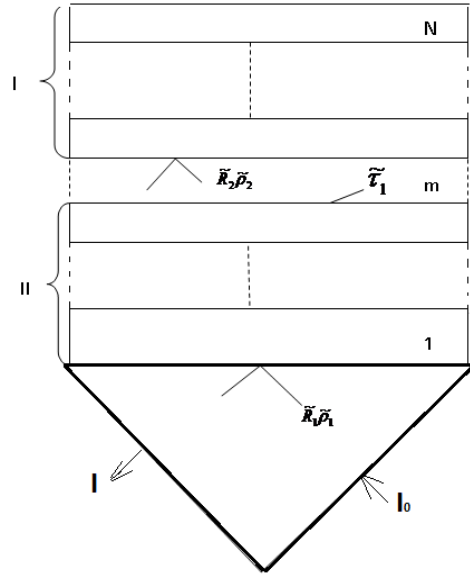


Рис. 2. Схематическое изображение призмы ПВО с нанесенной на ее грань системой из  $N$  диэлектрических слоев, разбитой на две подсистемы I и II, разделенные промежуточным слоем с номером  $m$ . Символами  $I_0$  и  $I$  показаны, соответственно, падающий и отраженный потоки излучения

Из рис. 1 видно, что условие  $\tilde{D} > 0$ , при котором возможны действительные значения для оптической толщины слоя  $g_1$ , реализуются только при  $n_1 > 6$ . Разумеется, такие решения для практики не представляют интереса. С увеличением угла падения значения  $n_1$ , удовлетворяющие (11), уменьшаются (см. рис. 3). При достаточно больших углах падения

условие  $\Delta = 0$  может быть реализовано при реальных значениях  $n_1$  и  $n$ . Этот частный случай ранее был эмпирически найден в работе [12], где было показано, что при  $n = 1,50625$ ,  $n_1 = 2,05$ , фазовый сдвиг, близкий к нулю, может быть реализован для угла падения  $\theta = 77^\circ$ . Использование столь больших углов падения неприемлемо при использовании фазово-изотропного уголкового отражателя в качестве АФИЗ кольцевого лазерного резонатора. Для изготовления высокопрочных лазерных зеркал используются окислы металлов ( $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{SiO}_2$ ). В качестве материала призмы лучше всего использовать стекло марки К-8 ( $n = 1,52$ ). Если выбрать в качестве материалов слоев  $\text{ZrO}_2$  ( $n_H = 1,97$ ) и  $\text{SiO}_2$  ( $n_L = 1,45$ ), то, используя полученные выше выражения, можно показать, что для реализации  $\Delta = 0$  (при  $n = 1,52$ ,  $\theta = 45^\circ$ ) на грань призмы достаточно нанести 5 чередующихся слоев. В этом случае, какой бы слой мы ни выбирали в качестве промежуточного, условие (11) всегда выполняется и, следовательно, нулевой фазовый сдвиг достигается при действительном значении оптической толщины этого слоя, определяемом, согласно (10), для любых разумных значений оптических толщин остальных слоев. На рис. 2 показаны спектральные зависимости  $\Delta(\varphi)$  для двух найденных таким образом решений.

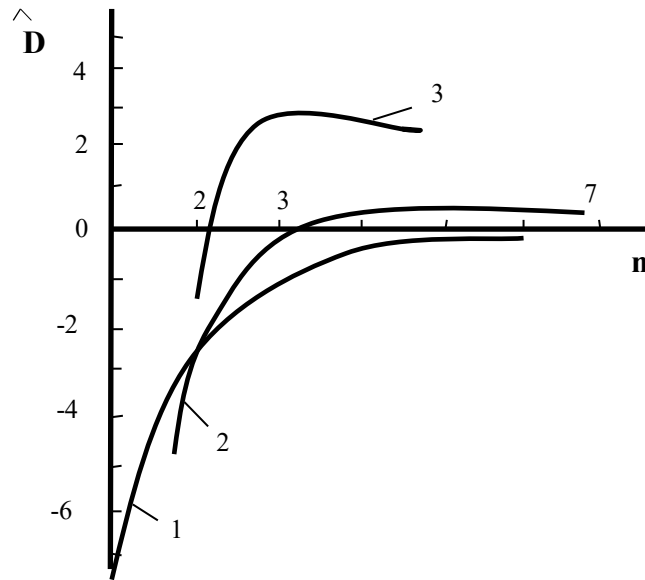


Рис. 3. Зависимость  $\hat{\Delta}(n_1)$  для однослойного покрытия, нанесенного на грань призмы ПВО при  $n=1,8$ ,  $\theta=45^\circ$  (кривая 1);  $n=1,8$ ,  $\theta=60^\circ$  (кривая 2);  $n=1,52$ ,  $\theta=75^\circ$  (кривая 3)

При использовании пленкообразующих материалов с большей разницей показателей преломления, например  $\text{ZnS}$  ( $n_H = 2,35$ ) и криолит ( $n_L = 1,33$ ), нулевой фазовый сдвиг достигается для трех (при  $n_{\text{П}} = 1,52$ ) и даже для двух слоев (правда, в этом случае в качестве призмы необходимо использовать более высокопреломляющие стекла, например ТФ-1 ( $n = 1,642$ )). Соответствующие этим случаям решения также показаны на рис. 2.

Таким образом, призма ПВО с нанесенной на ее отражающую грань системой диэлектрических слоев может быть использована для создания «глухих» АФИЗ (при условии просветления входной и выходной граней призмы), причем число слоев, необходимое для реализации такого зеркала, значительно снижается.

### Литература

1. Гавричев В.Д., Дмитриев А.Л. Волоконно-оптические датчики магнитного поля: учебное пособие. СПб: СПбНИУ ИТМО, 2013. 83 с
2. Путилин Э.С., Губанова Л.А. Оптические покрытия учеб. Санкт-Петербург: Лань, 2016. 268 с.
3. Борисов А.Н., Черных В.Т., Арбузов В.А. Синтез интерференционного фильтра для ультрафиолетовой области спектра // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 1. С. 86–90.
4. Акиншин В.С. [и др.] Оптика: учеб.пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2015. 240 с.
5. Бутиков Е.И. Оптика: учеб.пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2012. 608 с.
6. Spiller E. Totally reflectiugfbui film phase refardes. Appl.Opt. 1984. Vol. 23, No. 20. P. 3544–3549.
7. Southwell W.H. Multilayer coatings producing  $90^{\circ}$  phase change. Appl. Opt. 1979. Vol. 18, No. 11. P. 1875.
8. Southwell W.H. Multilayer coatings design achieving broadbaud  $90^{\circ}$  phase chift. Appl. Opt. 1980. Vol. 19, No. 16. P.2688–2692.
9. Паршаков А.Н. Введение в квантовую физику: учеб. пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2010. 352 с.
10. Корнеев В.И. Призмный уголкоый отражатель с диэлектрическими покрытиями // ОМП. 1985. № 12. С. 6–8.
11. Кард П.Г. Анализ и синтез многослойных интерференционных плёнок, Таллинн: Валгус, 1971, 235 с.
12. Введенский В.Д. [и др.]. Фазосдвигающее устройство на основе полного внутреннего отражения // ОМП. 1985. № 12. С. 6–8.

### Авторы публикации

**Никитин Александр Сергеевич** – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Высшая математика» (ВМ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

**Борисов Андрей Николаевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная электроника и светотехника» (ПЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

### References

1. Gavrichev V.D., Dmitriev A.L. Volokonno-opticheskie datchiki magnitnogo polya: uchebnoe posobie. SPb: SPbNIU ITMO, 2013. 83 p
2. Putilin E.S., Gubanova L.A. Opticheskie pokrytiya ucheb. Sankt-Peterburg: Lan', 2016. 268 p.
3. Borisov A.N., CHernykh V.T., Arbuzov V.A. Sintez interferentsionnogo fil'tra dlya ul'trafiol'etovoy oblasti spectra. Pribory i tekhnika eksperimenta, 2017, No. 1, P. 86–90.
4. Akin'shin V.S. [i dr.] Optika: ucheb.posobie. Sankt-Peterburg: Lan', 2015. 240 p.
5. Butikov E.I. Optika: ucheb.posobie. Sankt-Peterburg: Lan', 2012. 608 p.
6. Spiller E. Totally reflectsiugfbui film phase refardes. Appl.Opt. 1984. Vol. 23. No. 20. P. 3544–3549.
7. Southwell W.H. Multilayer coatings producing  $90^{\circ}$  phase change. Appl. Opt. 1979, Vol. 18, No. 11. P. 1875.
8. Southwell W.H. Multilayer coatings design achieving broadbaud  $90^{\circ}$  phase chift. Appl. Opt. 1980. Vol. 19. No. 16. P.2688–2692.
9. Parshakov A.N. Vvedenie v kvantovuyu fiziku: ucheb. posobie. Sankt-Peterburg: Lan', 2010. 352 p.
10. Korneev V.I. Prizmenny ugolkovyy otrazhatel' s dielektricheskimi pokrytiyami // OMP. 1985. No. 12. P. 6–8.
11. Kard P.G. Analiz i sintez mnogosloynnykh interferentsionnykh plenok. Tallinn: Valgus, 1971. 235 p.

12. Vvedenskiy V.D. [i dr.]. Fazosdvigayuschee ustroystvo na osnove polnogo vnutrennego otrazheniya // OMP. 1985. No. 12. P. 6–8.

**Authors of the publication**

***Nikitin AleksandrSergeevich*** – Cand. Sci. (phis.-math.), Associate Professor of Mathematics, Kazan State Power Engineering University.

***Borisov AndreyNikolaevich*** – Cand. Sci. (Techn.), professor of industrial electronics and lighting of Kazan State Power Engineering University.

***Поступила в редакцию***

***12 декабря 2017 г.***