

УДК 535.41

ДВУХСЛОЙНЫЕ ФАЗО-КОМПЕНСИРУЮЩИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Г.В. Никандров^а, Э.С. Путилин^а, Л.А. Губанова^а, Д. Стародубов^б^аУниверситет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия, nikandrov.spb@mail.ru^бУниверситет Южной Калифорнии, 90089, Лос Анджелес, Калифорния, США,

Аннотация. Разработаны оптические интерференционные покрытия, позволяющие формировать волновой фронт без изменения энергетических характеристик падающего и отраженного излучения. Корректировка достигается за счет того, что в состав покрытия вводится слой, толщина которого является функцией координаты поверхности оптического элемента. Для устранения изменения коэффициента отражения по поверхности оптического элемента, возникающего из-за наличия в составе покрытия слоя непостоянной толщины, предложена методика выбора показателей преломления материалов, формирующих двухслойное интерференционное покрытие, позволяющая создавать покрытия с постоянным коэффициентом по поверхности оптического элемента. В качестве пленкообразующих материалов использованы оксид магния и диоксид циркония. В работе приводится экспериментально полученное распределение толщины слоя, входящего в состав фазо-компенсирующего покрытия. Предложенный в работе новый класс оптических покрытий может быть использован для корректировки формы волнового фронта.

Ключевые слова: волновой фронт, интерференционные покрытия, диэлектрические слои, фаза отраженного излучения.

Благодарности. Работа выполнена при государственной финансовой поддержке Российского научного фонда (Соглашение № 14-23-00136).

TWO-LAYER PHASE COMPENSATING INTERFERENCE SYSTEMS

G.N. Nikandrov^a, E.S. Putilin^a, L.A. Gubanova^a, D. Starodubov^b^aITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia, nikandrov.spb@mail.ru^bUniversity of Southern California, 90089, Los Angeles, CA, USA

Abstract. The paper deals with creation of optical interferential coatings, giving the possibility to form the wave front without the change of energy characteristics of the incident and reflected radiation. Correction is achieved due to the layer, which thickness is a function of coordinate of an optical element surface. Selection technique is suggested for refractive index materials, forming two-layer interference coating that creates a coating with a constant coefficient of reflection on the surface of the optical element. By this procedure the change of coefficient of reflection for the optical element surface, arising because of the variable thickness is eliminated. Magnesium oxide and zirconium dioxide were used as the film-forming materials. The paper presents experimentally obtained thickness distribution of the layer, which is a part of the phase compensating coating. A new class of optical coatings proposed in the paper can find its application for correcting the form of a wave front.

Keywords: wave front, interference coatings, dielectric layers, reflected radiation phase.

Acknowledgements. The work was partially financially supported by the Russian Scientific Foundation (Agreement № 14-23-00136).

Диэлектрические интерференционные покрытия на оптических элементах, как правило, выполняют только одну функцию – изменение энергетических характеристик прошедшего или отраженного излучения. Однако им можно придать дополнительные функции по формированию фронта световой волны [1–4], например, исправление дефектов подложки, исправление аберраций, получение длиннофокусных сферических зеркал, создание асферических поверхностей, использование во внутренних резонаторах для аподизации пучков лазеров большой мощности, фазированное объединение пучков лазеров и другие. При этом, как правило, присоединение второй функции приводит к ухудшению первой, связанной с формированием энергетических характеристик отраженного или прошедшего излучения. Задача работы – создание покрытий, позволяющих формировать волновой фронт без существенного изменения отражения (пропускания) оптического элемента, на поверхности которого сформировано такое покрытие.

Для решения такой задачи могут быть использованы фазо-компенсирующие интерференционные системы, сформированные на поверхности оптического элемента. У этих систем толщина одного или нескольких слоев является функцией координаты подложки, при этом фаза отраженного и прошедшего излучения меняется по поверхности оптического элемента по заданной зависимости, а энергетические коэффициенты пропускания и отражения не зависят от координаты. Подобием таких систем является киноформы [5]. С их помощью можно управлять волновым фронтом световых волн на структурах с заданным изменением толщины и (или) показателя преломления вещества. Киноформные элементы имеют существенные преимущества по сравнению с традиционными оптическими элементами: малый вес, небольшие габариты. Но также эти элементы обладают рядом существенных недостатков: влияние износа резца при их изготовлении на параметры элемента, недостаточная точность, ограниченные возможности изготовления неосесимметричных элементов, высокая трудоемкость и, как следствие, высокая стоимость изготовления. Фазо-компенсирующие покрытия лишены подобных недостатков.

Фазо-компенсирующие системы могут содержать разное количество слоев. Энергетические и фазовые характеристики тонкослойной интерференционной системы могут быть найдены с помощью описания таких систем матрицей интерференции [6]

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{M}_2 \dots \cdot \mathbf{M}_j,$$

где j – количество слоев. Рассмотрим двухслойную интерференционную систему, у которой толщина слоя, граничащего с воздухом, является функцией координаты по поверхности подложки, а второй слой имеет постоянную толщину, которая равна четверти рабочей длины волны. Такая система может быть описана следующей матрицей интерференции:

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{M}_2 = \begin{vmatrix} \cos \varphi_1(x) & \frac{i}{n_1} \sin \varphi_1(x) \\ in_1 \sin \varphi_1(x) & \cos \varphi_1(x) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 & \frac{i}{n_2} \\ in_2 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{n_2}{n_1} \sin \varphi_1(x) & \frac{i}{n_2} \cos \varphi_1(x) \\ in_2 \cos \varphi_1(x) & \frac{n_1}{n_2} \sin \varphi_1(x) \end{vmatrix}.$$

В этом случае для двухслойной системы амплитудный коэффициент отражения может быть определен из соотношения

$$r = \frac{(n_o \mathbf{M}_{11} - n_m \mathbf{M}_{22}) + i(n_o n_m \mathbf{M}_{12} - \mathbf{M}_{21})}{(n_o \mathbf{M}_{11} + n_m \mathbf{M}_{22}) + i(n_o n_m \mathbf{M}_{12} + \mathbf{M}_{21})} = \frac{\left(\frac{n_0 n_2}{n_1} - \frac{n_m n_1}{n_2}\right) \sin \varphi_1(x) + i \left(\frac{n_0 n_m}{n_2} - n_2\right) \cos \varphi_1(x)}{\left(\frac{n_0 n_2}{n_1} + \frac{n_m n_1}{n_2}\right) \sin \varphi_1(x) + i \left(\frac{n_0 n_m}{n_2} + n_2\right) \cos \varphi_1(x)}, \quad (1)$$

а фазовые параметры – из соотношения [7]

$$r = \frac{A'(\cos \varphi_1(x) + i \sin \varphi_1(x))}{B'(\cos \varphi_1(x) - i \sin \varphi_1(x))} = \frac{A'}{B'} e^{-2i\varphi_1(x)}.$$

Здесь n_1 и n_2 – показатели преломления материалов, из которых формируется первый и второй слой соответственно; x – координата на поверхности оптического элемента, отсчет ведется от центра оптического элемента, $\varphi_1 = 2\pi n_1 d_1(x)/\lambda$ и $d_1(x)$ – фазовая и геометрическая толщина слоя в точке с координатой x соответственно, λ – рабочая длина волны. Зависимость (1) позволяет определить соотношение между показателями преломления материалов слоев, входящих в состав покрытия, которые бы обеспечивали постоянство коэффициента отражения при изменяющейся толщине слоя, граничащего с воздухом [8]. Это соотношение имеет вид $n_1 = n_2^2/n_m$. На основе полученных результатов была рассчитана конструкция фазо-компенсирующего покрытия, состоящего из слоев MgO и ZrO₂, и сформирована на оптическом элементе, изготовленном из стекла марки Borofloat 33.

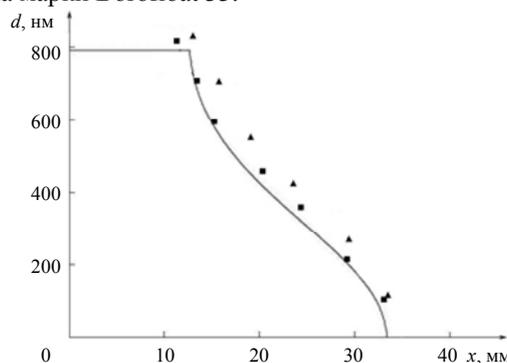


Рисунок. Распределение толщины градиентного слоя (d)

— – рассчитанное распределение, ■ – экспериментально полученное распределение для $\lambda=465$ нм, ▲ – экспериментально полученное распределение для $\lambda=525$ нм

Покрытия такого типа целесообразно изготавливать методом термического испарения пленкообразующих веществ в вакууме. Для получения слоя с заданным распределением толщины слоя по поверхности оптического элемента можно воспользоваться схемой формирования слоев с заданным распределением толщины по поверхности оптического элемента, представленной в [9]. Для получения заданного распределения слоя была изготовлена оснастка, параметры которой были выбраны с учетом соотношений, представленных в [10]. Перед формированием слоев была проведена аттестация пленкообразующих материалов с использованием метода, изложенного в [11, 12]. Данный метод заключается в том, что были изготовлены четвертьволновые слои из оксида магния и диоксида циркония, используемых в качестве пленкообразующих материалов. Далее были измерены спектральные характеристики полученных слоев и по величине экстремумов определены их показатели преломления.

Полученное покрытие было аттестовано с целью определения распределения толщины слоя по поверхности оптического элемента. Как видно из рисунка, фазо-компенсирующее покрытие имеет распределение толщины по поверхности оптического элемента, близкое к заданному распределению толщины слоя по поверхности оптического элемента. Рассмотренный в работе новый класс оптических покрытий может быть использован для корректировки формы волнового фронта.

References

1. Zhiglinskii A.G., Putilin E.S. Formirovanie volnovogo fronta s pomoshch'yu interferentsionnykh pokrytii [Formation of the wavefront using the interference coatings]. *Optics and Spectroscopy*, 1972, vol. 32, no. 6, pp. 27–31.
2. Yasui K., Tanaka M., Yagi S. Unstable resonator with phase-unifying coupler for high-power laser. *Applied Physics Letters*, 1988, vol. 52, no. 7, pp. 530–531. doi: 10.1063/1.99406
3. Paré C., Bélanger P.-A. Optical resonators with graded-phase mirrors. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 1998, vol. 3267, pp. 226–233. doi: 10.1117/12.308110
4. Kotlikov E.N., Prokashev V.N., Khonineva E.V. Synthesis of unstable resonator output mirrors with phase front compensation. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2001, vol. 4353, pp. 69–74. doi: 10.1117/12.417715
5. Fishman A.I. Fazovye opticheskie elementy - kinoformy [The phase optical elements - kinoforms]. *Sorosovskii Obrazovatel'nyi Zhurnal*, 1999, no. 12, pp. 76–83.
6. Berning P. Theory and methods of calculation of the optical properties of thin films. In *Physics of Thin Films*. Eds. G. Hass, R.E. Thun. NY, London, Academic Press, 1964.
7. Belashenkov N.R., Gubanova L.A., Putilin E.S. Fimin P.N. Formirovanie volnovogo fronta otrazhennogo izlucheniya gradientnymi zerkalami [Formation of the wavefront of the reflected radiation gradient mirrors]. *Tezisy Dokladov Mezhdunarodnoi Konferentsii Prikladnaya Optika-96* [Proc. International Conference Applied Optics-96]. St. Petersburg, 1996, p. 197.
8. Nikandrov G.V. Fazo-kompensiruyushchie pokrytiya [Phase-compensating cover]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2008, no. 4 (49), pp. 3–6.
9. Gubanova L.A. Kriterii vybora i sintez uslovii osazhdeniya gradientnykh system [Selection criterion and synthesis of the deposition conditions of gradient systems]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2004, no. 4 (15), pp. 145–149.
10. Nikandrov G.V. Razrabotka tekhnologii sozdaniya fazo-kompensiruyushchikh pokrytii [Development of technology for the creation of a phase-compensating coatings]. *Sbornik Tezisev VIII Vserossiiskoi Mezhvuzovskoi Konferentsii Molodykh Uchenykh. Vyp. 2. Optotekhnika i Opticheskie Materialy* [Proc. VIII All-Russian Inter-University Conference of Young Scientists. V. 2 Optotekhnika and Optical Materials]. St. Petersburg, SPbSU ITMO, 2011, pp. 53–54.
11. El'gart Z.E. *Balansno-dvukhvolnovoi metod kontrolya opticheskikh tolshchin sloev. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Balancing the two-wave control method of optical thicknesses of the layers. Dr. eng. sci. diss.]. St. Petersburg, SPbSU ITMO, 1998, 217 p.
12. Kantsel'son L.B. Metody kontrolya opticheskoi tolshchiny interferentsionnykh plenok, nanosimykh v vakuume. Obzor [Methods to control the optical thickness of the interference films applied in a vacuum. Review]. *Optiko-Mekhanicheskaya Promyshlennost'*, 1969, no. 4, pp. 50–58.

Никандров Георгий Васильевич	– аспирант, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия, nikandrov.spb@mail.ru
Путилин Эдуард Степанович	– доктор технических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
Губанова Людмила Александровна	– доктор технических наук, доцент, профессор, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия, la7777@mail.ru
Стародубов Дмитрий	– кандидат физико-математических наук, кандидат физико-математических наук, Университет Южной Калифорнии, 90089, Лос Анджелес, Калифорния, США,
Georgiy V. Nikandrov	– postgraduate, ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia, nikandrov.spb@mail.ru
Edward S. Putilin	– D.Sc., Professor, Professor, ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia
Lujdmila A. Gubanova	– D.Sc., Associate professor, Professor, ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia, la7777@mail.ru
Dmitry Starodubov	– PhD, scientist, University of Southern California, 90089, Los Angeles, CA, USA, dstarodubov@gmail.com

Принято к печати 16.07.14
Accepted 16.07.14