

**ОПТИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ НАНОПОРИСТЫХ ПЛЕНОК ОКСИДА АЛЮМИНИЯ
КАК ОСНОВА ДЛЯ СОЗДАНИЯ АХРОМАТИЧЕСКИХ ФАЗОВЫХ ПЛАСТИН
С ПЕРЕМЕННОЙ РАЗНОСТЬЮ ФАЗ ОРТОГОНАЛЬНО ПОЛЯРИЗОВАННЫХ
КОМПОНЕНТ ИЗЛУЧЕНИЯ, ПРОШЕДШЕГО ПЛЕНКУ**

В. А. Длугунович¹, А. Ю. Жумарь^{1*}, Н. И. Мухуров²

УДК 535.012.21

<https://doi.org/10.47612/0514-7506-2023-90-2-324-328>

¹ Институт физики НАН Беларуси,

Минск, Беларусь; e-mail: a.zhumar@ifanbel.bas-net.by

² ГНПО “Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника”,

Минск, Беларусь; e-mail: mukhurov@oelt.basnet.by

(Поступила 30 января 2023)

Методом стокс-поляриметрии определены значения двулучепреломления нанопористых пленок оксида алюминия. Измерены коэффициенты пропускания пленки и степень поляризации прошедшего излучения для углов падения, при которых разность фаз ортогонально поляризованных компонент излучения, прошедшего пленку, составляет $\lambda/4$ или $\lambda/2$. С использованием модели Максвелла—Гарнета проведены оценки пористости и радиусов пор пленок. Показана возможность создания на основе нанопористой пленки оксида алюминия ахроматических фазовых пластин с переменной разностью фаз ортогонально поляризованных компонент излучения, прошедшего пленку, которые могут функционировать как четвертьволновая и полуволновая пластины.

Ключевые слова: нанопористая пленка, оксид алюминия, параметры Стокса, двулучепреломление, фазовая пластина, теория эффективной среды, коэффициент пропускания.

Stokes polarimetry was used to evaluate the birefringence of nanoporous alumina films. The transmittance of the film and the degree of polarization of the transmitted radiation were measured for the angles of incidence at which the phase difference of the orthogonal polarized components of the transmitted radiation reach to $\lambda/4$ or $\lambda/2$. Using the Maxwell—Garnet model, the porosity and pore radii of the films were estimated. The possibility of creating achromatic phase plates with a variable phase difference of the orthogonal polarized components of the transmitted radiation, which can function as a quarter-wave and half-wave plates, based on a nanoporous alumina film, is shown.

Keywords: nanoporous film, alumina, Stokes parameters, birefringence, phase plate, effective medium theory, transmittance.

Введение. Явление двулучепреломления, обусловленное анизотропией формы, когда фазовая анизотропия возникает в некоторой упорядоченной системе частиц из оптически изотропного вещества, размер которых велик по сравнению с размерами молекул, но мал по сравнению с длиной волны излучения, известно давно [1, 2]. Бурное развитие технологий создания различных наноконструктивных сред с заданной упорядоченной структурой [3, 4] позволяет в полной мере исследовать данное явление.

**NANOPOROUS ALUMINA FILMS OPTICAL ANISOTROPY AS THE BASIS FOR CREATION
OF ACHROMATIC PHASE PLATES WITH A VARIABLE PHASE DIFFERENCE OF THE
ORTHOGONAL POLARIZED COMPONENTS OF THE TRANSMITTED RADIATION**

V. A. Dlugunovich¹, A. Yu. Zhumar^{1*}, N. I. Mukhurov² (¹ B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus; e-mail: a.zhumar@ifanbel.bas-net.by; ² SSPA “Optics, Optoelectronics, and Laser Technology”, Minsk, Belarus; e-mail: mukhurov@oelt.basnet.by)

Цель работы — изучение двойного лучепреломления формы в нанокompозитных пористых пленках оксида алюминия методом стокс-поляриметрии для создания на их основе ахроматических фазовых пластинок с переменной разностью фаз от 0 до $\lambda/2$.

Основы стокс-поляриметрии. Отраженное (рассеянное) и прошедшее через вещество излучение может быть представлено совокупным некогерентным пучком, описываемым четырьмя параметрами, образующими четырехмерный вектор-параметр Стокса \mathbf{S} [5—10]. Все параметры Стокса I , P_1 , P_2 , P_3 имеют размерность интенсивности и полностью характеризуют состояние поляризации излучения. Первый из них I является полной интенсивностью излучения. Остальные компоненты вектора: P_1 — разность интенсивностей компонент излучения, поляризованных под углами 0 и 90°, P_2 — разность интенсивностей компонент излучения, поляризованных под углами 45 и 135°, P_3 — разность интенсивностей компонент излучения, поляризованных право- и левоциркулярно. Обычно рассматривают параметры Стокса в системе координат, ось z которой ориентирована в направлении распространения излучения, а оси x , y расположены в перпендикулярной плоскости и составляют с осью z правовинтовую тройку осей координат. Параметры Стокса P_1 , P_2 зависят от выбора направления осей x , y ; I и P_3 — инвариантны к системе координат [7—10]. Вектор Стокса запишем в нормированном виде:

$$\mathbf{S} = I\{1, p_1, p_2, p_3\}, \quad (1)$$

где $p_1 = P_1/I$; $p_2 = P_2/I$ и $p_3 = P_3/I$ — нормированные параметры Стокса. Параметры Стокса I , P_1 , P_2 , P_3 могут принимать любое значение от $-I$ до I . Если какой-либо из параметров P_1 , P_2 , P_3 не равен нулю, то это означает, что в исследуемом излучении присутствует поляризованная компонента. Если параметр P_1 , P_2 либо P_3 отрицателен, то это означает, что преимущественной является ортогональная форма поляризации.

Наряду с параметрами, определяемыми по (1), для описания поляризованного излучения используются другие поляризационные характеристики, такие как степень P и азимут поляризации φ , а также угол эллиптичности ε , связанные с параметрами Стокса [9]:

$$P = \sqrt{(P_1^2 + P_2^2 + P_3^2)} / I; \quad \varphi = 1/2 \arctg(P_2 / P_1); \quad \sin 2\varepsilon = P_3 / IP. \quad (2)$$

Методика эксперимента и обработки данных. Нанопористые упорядоченные пленки оксида алюминия формировались электрохимическим окислением в потенциостатическом режиме при электрическом напряжении 40 В, температуре 3 %-го щавелевокислого электролита 10 °С по двухстадийной методике [11, 12]. Исследуемые пленки различались пористостью (фактором заполнения), которая оценивалась по формуле $f = \pi r^2 / D^2$, где r — радиус пор, D — расстояния между центрами соседних пор. Полученные пленки имели одинаковые расстояния между центрами соседних пор $D \sim 110$ нм. Радиус пор зависел от времени травления образца в кислоте, которое варьировалось от 3 до 14 с. Толщина пленок $d \approx 30$ мкм.

Для изучения фазовой анизотропии пленок применен стокс-поляриметр на основе жидкокристаллических пластин с регулируемой разностью фаз [13]. Измерения параметров Стокса излучения, прошедшего через нанопористые пленки оксида алюминия, проведены с помощью лазеров, генерирующих излучение на длинах волн 400, 633, 808 и 980 нм, при азимуте падающего линейно поляризованного излучения 45°. Угол между оптической осью стокс-поляриметра и нормалью к поверхности пленки $\alpha = 0$ —60°. Коэффициенты пропускания исследуемых пленок для ортогонально поляризованных компонент излучения:

$$\tau_x = I_0^{\text{пр}}(\alpha) / I_0^{\text{пад}}(\alpha), \quad \tau_y = I_{90}^{\text{пр}}(\alpha) / I_{90}^{\text{пад}}(\alpha), \quad (3)$$

где $I_0^{\text{пад}}(\alpha)$, $I_{90}^{\text{пад}}(\alpha)$ и $I_0^{\text{пр}}(\alpha)$, $I_{90}^{\text{пр}}(\alpha)$ — интенсивности излучения, падающего на образец и прошедшего через него при азимутах поляризации 0 и 90° соответственно.

Двунаправленный коэффициент пропускания пленки определялся как

$$T = (\tau_x + \tau_y) / 2. \quad (4)$$

Стандартная неопределенность измерения коэффициентов пропускания $T \leq 0.01$. Стандартная неопределенность измерения нормированных параметров Стокса и степени поляризации регистрируемого излучения ≤ 0.015 . Стандартная неопределенность измерения азимута поляризации и угла эллиптичности регистрируемого излучения ≤ 0.02 рад. Стандартная неопределенность измерения сдвига фаз ортогонально поляризованных компонент регистрируемого излучения $\leq 3^\circ$.

Разность фаз ортогонально поляризованных компонент излучения (Δ), прошедшего пленку, определяем из выражения [14]:

$$\sin 2\varepsilon = \frac{\sqrt{1-q^2} P \sin 2\varphi \sin \Delta}{\sqrt{(1+qP \cos 2\varphi)^2 - (1-q^2)(1-P^2)}}, \quad (5)$$

где q — поляризующая способность пленки.

Результаты и их обсуждение. Для нанопористой пленки оксида алюминия расстояния между порами значительно меньше длины волны зондирующего излучения. Когда поры в пленке ориентированы перпендикулярно поверхности, следует ожидать наличия двойного лучепреломления формы. Такая пленка проявляет свойства положительного одноосного кристалла, при этом оптическая ось кристалла направлена по нормали к поверхности [1, 2, 15, 16]. Тогда разность фаз ортогонально поляризованных компонент излучения, прошедшего пленку d (в случае падения излучения по нормали):

$$\Delta = 2\pi(n_e - n_o)d/\lambda, \quad (6)$$

где λ — длина волны зондирующего излучения; n_e, n_o — показатели преломления пленки для излучения, поляризованного вдоль пор или перпендикулярно им.

Для случая падения излучения под углом α к оптической оси пленки рассчитаем

$$n_e(\theta) = \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_e^2 \cos^2 \theta + n_o^2 \sin^2 \theta}}, \quad (7)$$

где $\sin \alpha = n_e(\theta) \sin \theta$. Введем величину $d^* = d/\cos \theta$ и получим

$$\Delta = 2\pi d^* n_o \left(\frac{n_e}{\sqrt{n_e^2 \cos^2 \theta + n_o^2 \sin^2 \theta}} - 1 \right) / \lambda. \quad (8)$$

Методом наименьших квадратов по выборкам значений Δ , рассчитанных по формуле (5), проведены оценки величин n_e и n_o пленок оксида алюминия на двух длинах волн падающего излучения (табл. 1). Видно, что значения двулучепреломления Δn в видимой области спектра выше, чем в ближней ИК. Сравнение экспериментально полученных и теоретически рассчитанных по (8) значений Δ показывает различия $< 3^\circ$ в области рассматриваемых углов падения излучения на образец. Для оценки пористости пленок воспользуемся теорией эффективной среды, в частности обобщением модели Максвелла—Гарнета для случая анизотропии формы, в соответствии с которой [17—19]:

$$n_o^2 = \frac{\beta f n_1^2 + n_m^2 (1-f)}{\beta f + (1-f)}, \quad (9)$$

$$n_e^2 = n_1^2 f + n_m^2 (1-f), \quad (10)$$

где β — фактор поля, который характеризует, во сколько раз средняя напряженность электрического поля в каждом из компонентов среды отличается от средней напряженности электрического поля во всей гетеросистеме; для случая включений в виде цилиндров $\beta = 2n_m^2 / (n_m^2 + n_1^2)$ или $\beta = 1$ в зависимости от направления вектора электрической напряженности электрического поля (перпендикулярно или вдоль оси поры пленки); n_m, n_1 — показатели преломления матрицы (оксида алюминия) и вещества, заполняющего поры. В рассматриваемом случае $n_1^2 = 1$.

Для вычисления пористости пленок значения $n_{e,o}$ взяты из табл. 1. При этом не учитывалась естественная фазовая анизотропия данного образца, n_m вычислялось как полусумма обыкновенного и необыкновенного показателей преломления образца, который не подвергался травлению в кислоте. Расчет пористости пленок проведен для каждой из длин волн излучения, после чего вычислены средняя пористость и среднеквадратичное отклонение (табл. 2). Пористость исследуемых пленок варьировались от 0.1 ± 0.01 до 0.23 ± 0.02 . Следовательно, радиус пор изменялся от 20.0 ± 0.5 до 30.7 ± 1.2 нм.

В зависимости от пористости пленок оксида алюминия оценены экспериментально установленные углы падения излучения, при которых разность фаз ортогонально поляризованных компонент излучения, прошедшего пленку, составляет $\lambda/4$ или $\lambda/2$, а также измерены соответствующие коэффициенты пропускания пленок и степени поляризации прошедшего излучения (табл. 3).

Отметим общие особенности поведения нанопористых пленок оксида алюминия в видимой и ближней ИК-областях спектра (табл. 3): 1) с увеличением пористости пленки угол падения излучения на пленку, при котором она является четвертьволновой или полуволновой пластиной, уменьша-

ется; 2) с увеличением пористости пленки угол перехода из режима функционирования пленки как четвертьволновой пластины к полуволновой уменьшается; 3) степень поляризации излучения, прошедшего пленки с разной пористостью, изменяется незначительно; 4) для одной и той же пористости пленки при переходе из режима функционирования пленки как четвертьволновой пластины к полуволновой коэффициенты пропускания пленки изменяются не более чем в 1.2 раза.

Т а б л и ц а 1. Показатели преломления обыкновенного и необыкновенного лучей, двулучепреломление Δn образцов оксида алюминия, полученные при разном времени травления

Время травления образца, с	λ , нм	n_e	n_o	Δn	λ , нм	n_e	n_o	Δn
0	400	1.768	1.756	0.012	808	1.769	1.756	0.013
3		1.700	1.670	0.030		1.700	1.675	0.025
6		1.690	1.630	0.060		1.685	1.630	0.055
10		1.660	1.585	0.075		1.650	1.580	0.070
14		1.635	1.540	0.095		1.640	1.560	0.080
0	633	1.769	1.755	0.014	980	1.768	1.756	0.012
6		1.690	1.620	0.070		1.690	1.625	0.065
10		1.655	1.575	0.080		1.650	1.585	0.065
14		1.635	1.550	0.085		1.635	1.550	0.085

Т а б л и ц а 2. Пористость и радиус пор в зависимости от времени травления пленок оксида алюминия, оцененные с использованием обобщенной модели Максвелла—Гарнета

Время травления, с	Пористость f	Радиус пор r , нм
0	0	0
3	0.10±0.01	20.0±0.5
6	0.14±0.01	24.0±0.9
10	0.20±0.01	28.7±0.9
14	0.23±0.02	30.7±1.2

Т а б л и ц а 3. Коэффициент пропускания пленки T , степень поляризации прошедшего излучения P для углов падения излучения α на образец, при которых разность фаз ортогонально поляризованных компонент прошедшего излучения составляет $\lambda/4$ или $\lambda/2$, в зависимости от пористости пленок оксида алюминия

Пористость f	$\alpha(\Delta = \lambda/4)$	$T(\Delta = \lambda/4)$	$P(\Delta = \lambda/4)$	$\alpha(\Delta = \lambda/2)$	$T(\Delta = \lambda/2)$	$P(\Delta = \lambda/2)$
400 нм						
0.1±0.01	35.0°	0.62	0.98	56.0°	0.52	0.99
0.14±0.01	22.5°	0.60	0.96	33.0°	0.55	0.97
0.20±0.01	20.0°	0.55	0.95	29.0°	0.5	0.96
0.23±0.02	17.5°	0.28	0.94	26.0°	0.27	0.92
633 нм						
0.14±0.01	26.0°	0.84	0.97	40.5°	0.81	0.97
0.20±0.01	24.0°	0.84	0.98	35.0°	0.83	0.96
0.23±0.02	23.0°	0.68	0.97	34.0°	0.65	0.98
808 нм						
0.1±0.01	54.0°	0.80	0.98	—	—	—
0.14±0.01	33.0°	0.89	0.95	51.0°	0.75	0.98
0.20±0.01	30.0°	0.86	0.96	44.0°	0.79	0.97
0.23±0.02	28.5°	0.77	0.97	39.5°	0.73	0.92
980 нм						
0.14±0.01	35.0°	0.92	0.97	54.0°	0.75	0.96
0.20±0.01	34.0°	0.96	0.97	49.0°	0.88	0.96
0.23±0.02	30.0°	0.95	0.99	42.0°	0.90	0.98

Для видимой области спектра характерно, что с увеличением пористости коэффициенты пропускания пленки для углов падения излучения, при которых разность фаз ортогонально поляризованных компонент излучения, прошедшего пленку, составляет $\lambda/4$ или $\lambda/2$, уменьшается (табл. 3). Если сравнить пленки с пористостью 0.23 ± 0.017 и 0.14 ± 0.01 , то коэффициенты пропускания различаются не менее чем в 1.8 раза. Для ближней ИК-области характерно, что с изменением пористости коэффициенты пропускания пленки для углов падения излучения, при которых разность фаз ортогонально поляризованных компонент прошедшего излучения составляет $\lambda/4$ или $\lambda/2$, изменяются незначительно.

Заключение. Показано, что на основе нанопористой пленки оксида алюминия можно создавать устройства управления формой поляризации световых пучков в диапазоне 0.4—1.0 мкм, которые функционируют как четвертьволновая и полуволновая пластины с высокими коэффициентами пропускания и степенями поляризации прошедшего излучения. При этом переход от одного сдвига фаз ортогонально поляризованных компонент излучения к другому осуществляется путем изменения ориентации пленки относительно пучка падающего излучения.

- [1] М. Борн, Э. Вольф. Основы оптики, Москва, Наука (1973)
- [2] Л. А. Головань, В. Ю. Тимошенко, П. К. Кашкаров. УФН, **177** (2007) 619—638
- [3] T. Kikuchi, O. Nishinaga, Sh. Natsui, R. O. Suzuki. Electron. Acta, **156** (2015) 235—243
- [4] L. Micheli, N. Sarmah, H. Luo, K. S. Reddy, T. Mallick. Renewable and Sustainable Energy Reviews, **20** (2013) 595—610
- [5] D. H. Goldstein. Polarized Light, New York, Marcel Dekker (2003)
- [6] F. Le Roy-Brehonnet, B. Le Jeune. Prog. Quant. Electron., **21** (1997) 109—151
- [7] R. A. Chipman. In: Handbook of Optics. Washington, D.C., Opt. Soc. Am. (1995) 22.1—22.36
- [8] B. J. DeBoo. Investigation of Polarization Properties Using Active Imaging Polarimetry, PhD dissertation, University of Arizona (2004)
- [9] В. Н. Снопко. Поляризационные характеристики оптического излучения, Минск, Навука і тэхніка (1992)
- [10] А. Джеррард, Дж. М. Берч. Введение в матричную оптику, Москва, Мир (1978)
- [11] H. Masuda, K. Fukuda. Science, **268** (1995) 1466—1468
- [12] N. I. Mukhurov, I. V. Gasenkova, I. M. Andrukhovich. J. Mater. Sci. Nanotechnol., **1** (2014) 110—116
- [13] В. Н. Снопко. Измерит. техника, № 12 (2008) 19—22
- [14] В. А. Длугунович, А. Ю. Жумарь, Н. И. Мухуров. Журн. прикл. спектр., **85**, № 5 (2018) 836—842 [V. A. Dlugunovich, A. Yu. Zhumar, N. I. Mukhurov. J. Appl. Spectr., **85** (2018) 936—941]
- [15] M. Saito, M. Miyagi. J. Opt. Soc. Am., **A6** (1989) 1895—1903
- [16] A. A. Lutich, M. B. Danailov, S. Volchek, V. A. Yakovtseva, V. A. Sokol, S. V. Gaponenko. Appl. Phys. **B84** (2006) 327—331
- [17] К. Борен, Д. Хафмен. Поглощение и рассеяние света малыми частицами, Москва, Мир (1986)
- [18] R. Atkinson, W. R. Hendren, G. A. Wurtz, W. Dickson, A. V. Zayats, P. Evans, R. J. Pollard. Phys. Rev., **B73** (2006) 235402
- [19] G. Irmer, J. Monecke, P. Verma. Encyclopedia Nanosci. and Nanotech., **10** (2003) 1—26