

Реализация интерференционного оптического контроля для прозрачных и непрозрачных слоев

Ю. А. Новикова, Д.А. Попов, Г.В. Терещенко

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Аннотация: Создание современной многоэлементной оптической техники с требуемыми пространственно-частотными характеристиками требует применения оптических слоев с заданными параметрами. Только при применении многослойных покрытий можно достичь минимальных потерь на пропускание объективов и реализовать их антибликовую защиту, или получить высокие значения коэффициента отражения в зеркалах кольцевых резонаторов. Проверить готовность к производству такой оптики можно, например, посредством реализации контроля толщины как для прозрачных, так и для непрозрачных слоев, которая должна находиться в пределах допустимых отклонений от ожидаемого заданного значения. В данной статье приводится теоретическое обоснование интерференционного метода контроля толщины слоя, а также предлагаются оригинальные схемно-технические решения на его основе, позволяющие получить оценку искомой толщины.

Ключевые слова: оптические покрытия, поляризация, измерение толщины, подложка, пластина Савара.

Использование поляризационных элементов (поляризаторов, поляризационных светоделителей, компенсаторов, фазовых пластинок) позволяет конструировать высокоточные виброустойчивые интерференционные устройства для контроля оптической и геометрической толщины слоев [1,2]. Принципиальная схема контрольного устройства применительно к прозрачному слою, частично покрывающему прозрачную подложку, приведена на рис. 1. Поляризованный пучок с плоским волновым фронтом (Φ) после прохождения подложки со слоем становится ступенчатым (Φ') с глубиной ступеньки $(n - 1) d$ где n и d – показатель преломления и толщина слоя, соответственно [3,4].

Пластина Савара обеспечивает разделение светового пучка на два ортогонально поляризованных пучка, волновые фронты которых (Φ_1' , Φ_2') смещены вдоль линий, перпендикулярных направлению распространения светового пучка.

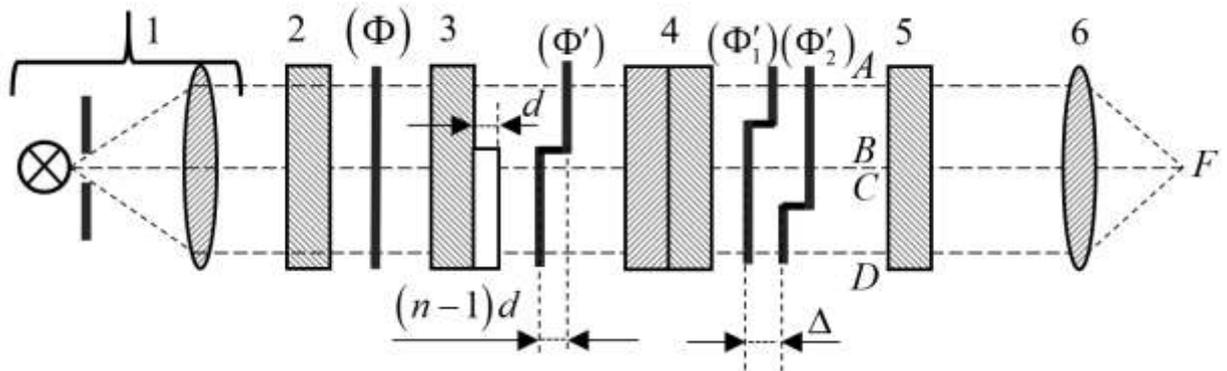


Рис. 1 – Схема поляризационного измерителя на основе пластины Савара (1 - коллиматор; 2 - поляризатор; 3 - подложка с покрытием; 4 - пластина Савара; 5 - анализатор; 6 – объектив)

Пластина Савара (рис. 2) может быть выполнена из двух одинаковых пластин одноосного кристалла, вырезанных таким образом, что нормаль к пластине составляет угол $\pi/4$ с оптической осью [5].

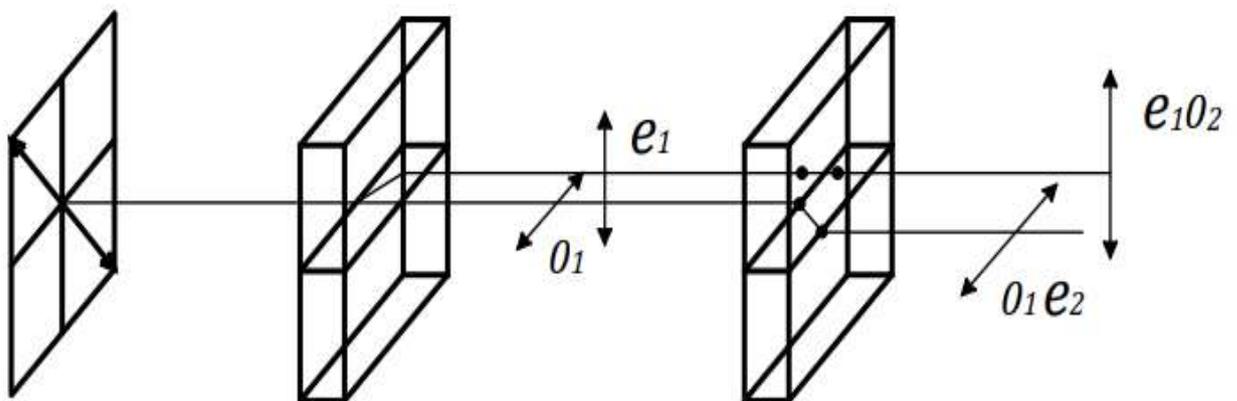


Рис. 2. – Пластина Савара

Из положения с одинаковой ориентацией вторая пластина повернута вокруг нормали на угол $\pi/2$. Если плоскость поляризации падающего пучка ориентирована произвольно по отношению к главной плоскости кристалла, то на выходе первой пластины образуются два пучка (o_1 и e_1), ортогонально

поляризованных и смещенных относительно друг друга. Оптическая разность хода между пучками o_1 и e_1 зависит от оптических параметров кристаллической пластины [6,7]. При прохождении пучков через вторую пластину, повернутую вокруг нормали на $\pi/2$, о-лучи становятся е-лучами и наоборот. Если толщины обеих пластин одинаковые, то на выходе системы появляются два пучка o_1e_2 и e_1o_2 , смещенных относительно друг друга, но прошедших одинаковый оптический путь. В общем случае волновые фронты (Φ_1' , Φ_2') ортогонально поляризованных световых пучков, выходящих из пластины Савара, смещены на величину Δ , зависящую от угла падения света на пластину [8]. Для нормального падения, Δ равна нулю и освещенность двух половин поля AB и CD равна нулю. При изменении угла падения света на пластину Савара минимумы освещенности будут в положениях, при которых $\Delta = m\lambda$, где m – целое число. Поворачивая пластину Савара, можно получить минимум освещенности в центральной части поля BC , где проходит граница слоя. Это имеет место при следующем соотношении [9]:

$$\Delta + (n-1)d = m\lambda.$$

При этом величина $(n-1)d$ может быть определена по двум положениям пластины Савара с разными величинами Δ_1 и Δ_2 , но для уточнения оценки следует провести несколько серий опытов с последующим усреднением величины. Для повышения точности измерений при реализации схемы, изображенной на рис. 2, можно использовать полутеневого поляриметр, разделяющий наблюдаемое поле на половины, в которых направления колебаний перпендикулярны друг другу. Линия раздела располагается перпендикулярно направлению края слоя (рис. 3).

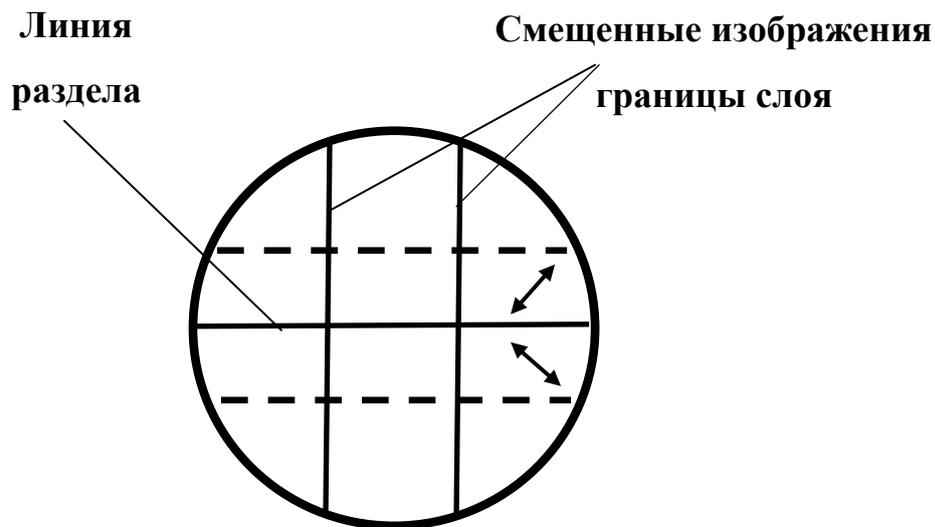


Рис. 3. – Наблюдаемое поле в полутеновом поляриметре

Если исследуемый слой является непрозрачным или допускает нанесение отражающего покрытия, для измерения его толщины можно использовать схему, изображенную на рис. 4 [10]. Призма Волластона 5 разделяет поляризованный пучок на два пучка, каждый из которых строит на поверхности подложки изображение щели 2. Два изображения щели на поверхности подложки можно перемещать вращением плоскопараллельной пластины 7. При отсутствии слоя, отраженные от поверхности подложки ортогонально поляризованные пучки света после прохождения в обратном ходе через объектив 6 и призму Волластона 5 образуют один пучок, плоскость поляризации которого составляет угол 45° с главными направлениями призмы. Однако, если световые пучки падают на исследуемый образец по разные стороны от края слоя, то после отражения между ними возникает оптическая разность хода и из призмы Волластона выходит эллиптически поляризованный свет.

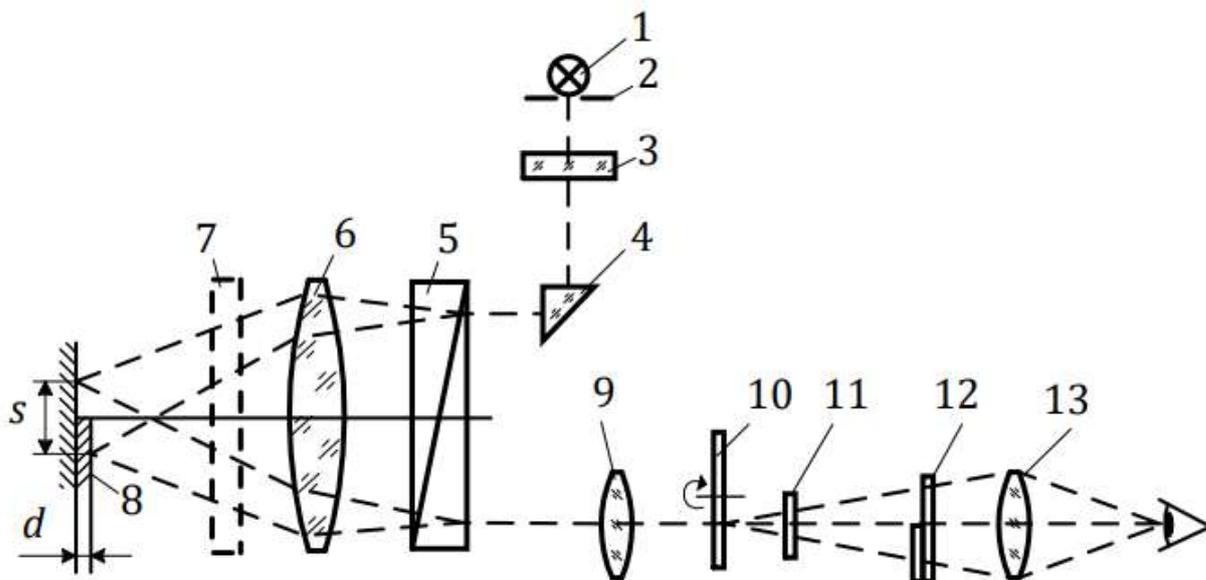


Рис. 4. – Оптическая схема поляризационного интерферометра для контроля толщины непрозрачных слоев: 1 – источник света; 2 – щель; 3 – поляризатор; 4 – призма; 5 – призма Волластона; 6, 9, 13 – объективы; 7 – плоскопараллельная пластина; 8 – спой; 10 – матовый экран; 11 – четвертьволновая пластина; 12 – полутеневое устройство чертежа, на угол $d/2s$, где d - толщина слоя. Можно также сместить объектив 6 в направлении, перпендикулярном оптической оси на расстояние $(f'_{об}d/2s)$, где $f'_{об}$ – фокусное расстояние объектива.

Для обеспечения условия, при котором выходящий пучок будет плоско поляризованным, можно повернуть подложку около оси, перпендикулярной плоскости. Использование длиннофокусного объектива позволяет сделать его смещения достаточно большими [10], что дает возможность измерять эти смещения с высокой точностью [11,12]. Регистрирующая система устройства включает объектив 9, вращающийся стеклянный матовый экран 10, четвертьволновую пластину 11, полутеневое устройство 12 и объектив 13. Глаз наблюдателя помещается в точке, сопряженной с изображением щели на

вращающемся экране 10. При использовании квазимонохроматического света добиваются равенства освещенностей частей наблюдаемого поля. Разброс результатов измерения в устройстве по схеме на рис. 4 составлял менее $0,0003\lambda$, что соответствует погрешности измерения толщины слоя порядка $\pm 0,01$ нм. Эти цифры показывают, что поляризационные интерферометры являются одними из наиболее точных приборов для определения толщины покрытий. Данный метод найдет широкое применение для измерения толщин нанослоев, изготовленных на основе перспективных современных технологий [13,14].

Литература

1. Kats M. A., Capasso F. Optical absorbers based on strong interference in ultra-thin films // *Laser and Photonics Reviews*. 2016. 10(5). pp. 735-749.
2. Bosman H., Lau Y. Y. & Gilgenbach R. M. Microwave absorption on a thin film // *Applied Physics Letters*. 2003. 82(9). pp. 1353-1355.
3. Zhang C., Xiangli B., Zhao B., Yuan X. A static polarization imaging spectrometer based on a Savart polariscope // *Optics Communications*. 2002. 203. pp. 21–26.
4. Рыжиков М.Б., Новикова Ю.А. Применение оптических узкополосных зеркал в измерителе концентрации пыли в угольных шахтах//Материалы III Международного форума «Метрологическое обеспечение инновационных технологий». Санкт-Петербург. 2021. С.328-329.
5. Blain P., Michel F., Renotte Y., Habraken S. Using a Savart plate in optical metrology // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineerin*. 2010. V. 7791. URL: doi.org/10.1117/12.860177

6. Kotlikov E. N., Novikova Yu. A., Yurkovets E. V. Method for determining the optical constants of films on absorbing substrates // J. Opt. Technol. 2018. V.85. pp. 651-655.
7. LuO H. [et al.]. Compact and miniature snapshot imaging polarimeter // Applied Optics. 2008. 47(24) – pp. 4413-4417.
8. Zhang C., Xiangli B., Zhao B. Permissible deviations of the polarization orientation in the polarization imaging spectrometer // Journal of Optics A: Pure Applied. Optics. 2004. 6 (8). pp. 815–817.
9. Хасс Г. Физика тонких плёнок. Том 2. М.: Мир, 1967. 396 с.
10. Dieter Meschede. Optics, Light and Lasers: The Practical Approach to Modern Aspects of Photonics and Laser Physics. Federal Republic of Germany. Mtirlenbach. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 1999. 421p.
11. Leonard Mandel, Emil Wolf. Optical Coherence and Quantum Optics. Great Britain. Cambridge University Press, 1995. 1166 p.
12. Li Y., Wang J., Changlun H., Bai J. A sub-aperture scanning method for detecting wavefront of long-focus lens // Photonics Asia, V.7849. 2010. URL: doi.org/10.1117/12.870537
13. Фиговский О.Л. Нанотехнологии для новых материалов // Инженерный вестник Дона, 2012, № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/1048.
14. Röseler A., Schade U. Polarizing interferometer for the unambiguous determination of the ellipsometric parameters. // Appl. Opt. 2020. V. 59. pp. 6619-6624.

References

1. Kats M. A., Capasso F. Laser and Photonics Reviews. 2016. 10(5). pp. 735-749.
-

2. Bosman H., Lau Y. Y. & Gilgenbach R. M. Applied Physics Letters. 2003. 82(9). pp. 1353-1355.
3. Zhang C., Xiangli B., Zhao B., Yuan X. Optics Communications. 2002. 203. pp. 21–26.
4. Ryzhikov M.B., Novikova YU.A. Materialy III Mezhdunarodnogo foruma «Metrologicheskoye obespecheniye innovatsionnykh tekhnologiy». Sankt-Peterburg. 2021. pp.328-329.
5. Blain P., Michel F., Renotte Y., Habraken S. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineerin. 2010
6. LuO H. [et al.]. Applied Optics. 2008. 47(24). pp. 4413-4417.
7. Zhang C., Xiangli B., Zhao B. Journal of Optics A: Pure Applied. Optics. 2004. 6 (8). pp. 815–817.
8. Khas G. Fizika tonkikh plënok. Tom 2. [Physics of thin films. Volume 2]. Moskva. Mir, 1967. 396 p.
9. Dieter Meschede. Optics, Light and Lasers: The Practical Approach to Modern Aspects of Photonics and Laser Physics. Federal Republic of Germany. Mtirlenbach. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. 1999. 421 p.
10. Leonard Mandel, Emil Wolf. Optical Coherence and Quantum Optics. Great Britain. Cambridge University Press, 1995. 1166 p.
11. Li Y., Wang J., Changlun H., Bai J. Photonics Asia. V.7849. 2010 URL: doi.org/10.1117/12.870537.
12. Figovskiy O.L. Inzhenernyj vestnik Dona. 2012. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/1048.
13. Röseler A., Schade U. Appl. Opt. 2020. V. 59. pp. 6619-6624.