

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИЕ

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ДИФРАКЦИИ НА ПЛЕНКАХ ПОЛИМЕРОВ С ПЕРИОДИЧЕСКИМ МИКРОРЕЛЬЕФОМ*

В.В. Беляев^{1,2}, К.В. Савцов¹, С.В. Мойсеенко¹, А.А. Горбунов¹, И.В. Попов³,
А.Л. Вольнский⁴, К.А. Пупков¹, А.Л. Маргарян⁵, А.С. Соломатин², Н.А. Бункина⁶

¹ Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, д. 6, Москва, Россия, 117198

² Московский государственный областной университет
ул. Радио, д. 10А, Москва, Россия, 105005

³ ОАО «Корпорация «Комета»
ул. Велозаводская, д. 5, Москва, Россия, 115280

⁴ Химический факультет
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 3, Москва, Россия, 119991

⁵ Ереванский государственный университет
Алека Манукяна, 1, Ереван, Республика Армения, 0025

⁶ Московский авиационный институт
(Национальный исследовательский университет)
Волоколамское шоссе, д. 4, Москва, Россия, 125993

Разработана и сконструирована автоматизированная система измерения дифракционной эффективности света, кинематическая схема. Выполнены измерения дифракционной эффективности света на образцах полимерных подложек с периодическим микрорельефом. Разработано программное обеспечение в среде Matlab для построения дифракционной картины в зависимости от геометрических параметров и длины волны. С использованием программного обеспечения определен период микрорельефа по результатам измерения дифракционной эффективности света. Правильность определения периода проверена с использованием независимого метода.

Ключевые слова: автоматизированный комплекс, полимерная подложка, дифракционная эффективность света, измерение параметров.

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант №14-07-00574-а и по гранту Президента Российской Федерации НШ-1495.2012.8.

Введение и постановка задачи

Для многих оптических, электрооптических и оптоэлектронных устройств используются дифракционные оптические элементы (ДОЭ) или элементы с периодическим микрорельефом. Они преобразуют направление распространения или спектральный состав светового пучка, что позволяет улучшить технические или эксплуатационные параметры устройств. Элементы, изготовленные из полимерных материалов, имеют малую массу и низкую стоимость изготовления. В [1–10] предложен оригинальный метод формирования периодического микрорельефа различной геометрии при растяжении полимерных пленок с твердым покрытием на их поверхности. При использовании метода можно варьировать период, высоту, форму микрорельефа. В [6–10] предложено использовать такую систему для использования в оптических устройствах и жидкокристаллических дисплеях. В [11; 12] описаны системы с динамическими поляризационными дифракционными решетками с использованием переориентации жидкого кристалла под действием электрического поля.

Из-за деформации пленки в ней возникает двулучепреломление [10], что усложняет использование обычных методов определения параметров дифракции на таких периодических системах. Поэтому задача разработки методов исследования дифракции света на периодической структуре новых полимерных систем, их автоматизации и обработки данных измерений является актуальной.

Целью работы является разработка автоматической системы измерения оптических параметров дифракционных элементов. В частности, это автоматическое и быстрое измерение дифракционной эффективности света, прошедшего через дифракционную решетку, представляющей собой образец полимера, сделанного из двулучепреломляющего материала с поверхностным микрорельефом.

Для достижения поставленной цели необходимо осуществить следующие задачи:

- разработать и сконструировать автоматизированную систему измерения дифракционной эффективности света, кинематическую схему и способы управления ею;
- выполнить измерения дифракционной эффективности света на образцах полимерных подложек с периодическим микрорельефом;
- разработать программное обеспечение в среде Matlab для построения дифракционной картины от геометрических параметров и длины волны;
- с использованием программного обеспечения определить период микрорельефа по результатам измерения дифракционной эффективности света;
- проверить правильность определения периода с использованием независимого метода.

Физическая модель дифракции на периодической структуре

Теория дифракции света на щели рассмотрена в [13; 14]. Для дифракции на единичной щели зависимость интенсивности света I от угла дифракции φ описывается выражением (1) (рис. 1).

$$I_{\varphi} = I_0 \frac{\sin \lambda}{\lambda b}, \quad (1)$$

где I_0 — интенсивность в центре дифракции.

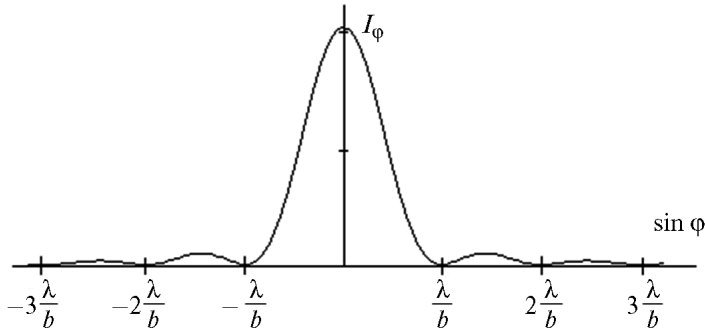


Рис. 1. Зависимость интенсивности от синуса угла дифракции

Увеличение ширины щели приводит к приближению первых минимумов к центру дифракционной картины, при этом резкость дифракционного максимума вырастает. Соотношение интенсивностей света в отдельных максимумах не изменяется, однако увеличивается абсолютное значение интенсивности, связанное с тем, что с увеличением ширины щели увеличивается энергия проходящего через нее излучения.

Практически значимым случаем является дифракция на нескольких щелях (дифракционной решетке). Дифракционной решеткой называется объект, состоящий из N нескольких бесконечно длинных щелей, обладающих равной шириной b и размещенных на равном расстоянии друг от друга. Обозначим как d расстояние между центрами смежных щелей (период решетки). На дифракционную решетку падает нормально монохроматический свет с длиной волны λ . Для интенсивности света, дифрагирующего в направлении, составляющем угол с нормалью, известно выражение (2) (рис. 2).

$$I_{\varphi} = I_0 \left(\frac{\sin u}{u} \right)^2 \left(\frac{\sin N \cdot \delta}{\sin \delta} \right)^2. \quad (2)$$

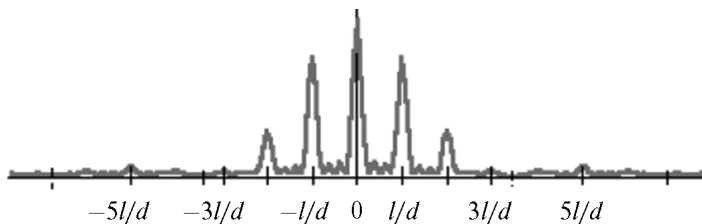


Рис. 2. Зависимость интенсивности от угла дифракции

Характерными точками этой зависимости являются:

— главные дифракционные минимумы $\sin \varphi = \lambda/b, 2\lambda/b, 3\lambda/b, \dots$;

— добавочные интерференционные минимумы $\sin \varphi = \lambda/Nd, 2\lambda/Nd, 3\lambda/Nd, \dots, (N - 1)\lambda/Nd, (N + 1)\lambda/Nd, \dots, (2N - 1)\lambda/Nd, (2N + 1)\lambda/Nd, \dots;$

— главные интерференционные максимумы $\sin \varphi = 0, \lambda/d, 2\lambda/d, 3\lambda/d, \dots$.

Следовательно, получив дифракционную картину на экране от решетки и вычислив число добавочных минимумов или максимумов между главными максимумами, можно определить количество щелей решетки.

Структура установки измерения параметров дифракции и ее модель

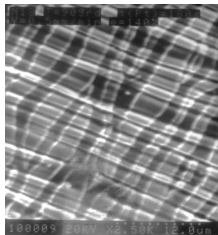
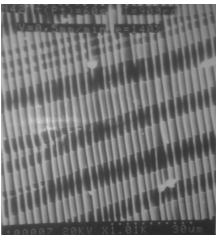
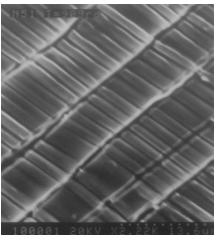
Описание образцов полимерных подложек с микрорельефом. В этой работе мы рассматриваем прохождение монохромной волны света через дифракционную решетку, представляющую собой образец полимера с поверхностным микрорельефом. Методы формирования образцов описаны в [1; 10]. В [10] показано, что при деформации полимерной подложки с твердым покрытием в полимере возникает поверхностный микрорельеф, а также наводится двулучепреломление.

В [10; 15; 16] описана программа расчета дифракции на оптически анизотропных решетках с поверхностным микрорельефом. В [17—19] приведены результаты расчета по этой программе для решеток с прямоугольным и синусоидальным микрорельефом.

Описание исследованных образцов с разными характеристиками микрорельефа, их свойств и методов получения (см. [1]) приведено в табл. 1.

Таблица 1

Исследуемые образцы и их свойства

Образец	18	42	51
Изображение поверхности образца с микрорельефом, полученное методом сканирующей электронной микроскопии			
Прибор	Инстрон	Инстрон	Инстрон
Исходные геометрические параметры (в зажиме)	ширина — 10 мм, длина — 30 мм	ширина — 10 мм, длина — 30 мм	
Предварительная обработка материала	спирт	спирт	
Время нанесения платинового (Pt) покрытия	60 с	180 с	
Температура деформации	90 °С	90 °С	
Время деформации	84 мин.	84 мин.	
Время выдержки при температуре деформации	25 мин.	25 мин.	
Время выдержки при комнатной температуре	8 мин.	8 мин.	
Скорость установленная	0,5 мм/мин.	0,5 мм/мин.	
Скорость реальная	0,5 мм/мин.	0,5 мм/мин.	
Относительное удлинение ϵ	140%	140%	
Относительное сжатие t	25%	30%	

Автоматизация и принципы управления. Процесс автоматизации и принципы управления для измерения дифракционной эффективности решетки разрабатывался для схемы, представленной на рис. 3. Луч монохроматического поляризованного света (поляризация перпендикулярна направлению бороздок решетки) проходит через образец решетки. Дифрагировавший свет разбивается на ряд пучков, соответствующих разным порядкам дифракции. На некотором расстоянии от образца расположен фотоприемник. Для регистрации интенсивности дифракции он перемещается по линейной траектории, на которой расположены максимумы дифракционных порядков.

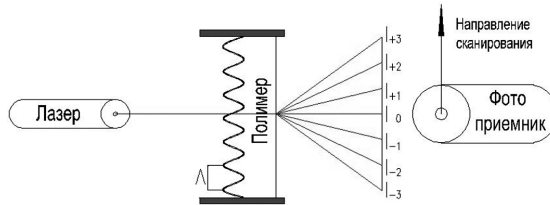


Рис. 3. Принципиальная схема установки

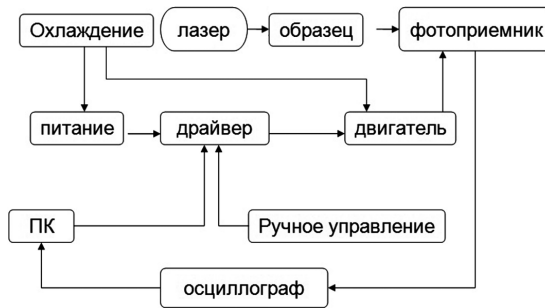


Рис. 4. Структурная схема установки

На схемах (рис. 5) показан принцип управления системы: *a* — объект управления — двигатель, *б* — объект управления — фотоприемник.

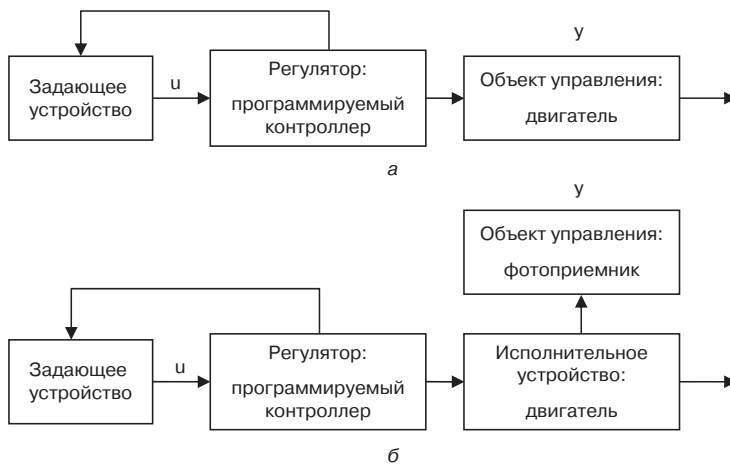


Рис. 5. Схема управления для двух объектов управления (ОУ): *a* — двигателя и *б* — фотоприемника

Для линейного возвратно-поступательного поперечного перемещения фотоэлемента был выбран шаговый двигатель. Но все имеющиеся на рынке модели двигателей не давали необходимой точности перемещения. Для этого в нашу автоматизированную систему измерений был внедрен программируемый блок управления шаговым двигателем, благодаря которому точность перемещения была увеличена в 16 раз. Также нужно было рассчитать, сможет ли линейный шаговый двигатель осуществлять это передвижение, т.е. хватит ли ему мощности для перемещения массы испытательной установки с фотоприемником (около 0,5 кг). Массу, которую может двигать двигатель, рассчитывают по формуле

$$m = \frac{F}{g \cdot k}, \quad (3)$$

где F — сила толкания двигателя; k — коэффициент трения.

При оценке по (3) получено $m >$ массы двигаемого объекта и данный двигатель удовлетворяет требованиям системы.

Расчет периода дифракционной решетки альтернативным методом. Следующим этапом работы является расчет периода для нескольких образцов полимеров. Образец полимера № 18 (см. табл. 1) был помещен на расстоянии $l = 8,5$ см от фотоэлемента. При возвратно-поступательном перемещении фотоэлемента и прохождении лазерного пучка с длиной волны $\lambda = 633$ нм через образец полимера зафиксировано положение максимума первого порядка дифракции на расстоянии $x = 2$ см от главного (нулевого) максимума. Угол дифракции φ можно рассчитать по формуле

$$\sin \varphi = \frac{x_k}{l}. \quad (4)$$

Зная угол φ , можно рассчитать период d микрорельефа образца полимера:

$$d = \lambda / \sin \varphi. \quad (5)$$

Для образца номер 18 период микрорельефа $d = 2690$ нм $\approx 2,7$ мкм.

Образец № 42 был помещен также на расстоянии $l = 8,5$ см от фотоэлемента. Пропуская луч лазера через образец, получено $x = 2,5$ см. По формуле (5) рассчитан период $d = 2152$ нм $\approx 2,2$ мкм.

Для образца № 51 период микрорельефа оказался равен $d = 2,7$ мкм, как и у образца № 18.

С использованием изображений поверхности образца с микрорельефом (см. табл. 1) были также рассчитаны периоды микрорельефа. Эти значения совпали со значениями, полученными при обработке данных измерения положения максимума интенсивности в первом порядке дифракции.

Выводы. Разработана автоматизированная система измерений дифракционной эффективности света, прошедшего через дифракционную решетку, представляющую собой образец полимера из двулучепреломляющего материала с периодическим микрорельефом.

Сконструирован и изготовлен физический макет установки.

Благодаря разработанной кинематической схеме и ее управлению можно задать линейное перемещение измерительного фотоэлемента в диапазоне от 0 до 100 мм с точностью до 0,075 мм фиксировать изменение оптических параметров дифракционных элементов.

Также разработано программное приложение в среде Matlab для построения дифракционной картинки на основе геометрических свойств и длины волны.

Измерение периода дифракционной решетки двумя независимыми методами показывает совпадение величин.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Волынский А.Л., Бакеев Н.Ф.* Структурная самоорганизация аморфных полимеров. М.: Физматлит, 2005. с.232.
- [2] *Баженов С.Л., Чернов И.В., Волынский А.Л., Бакеев Н.Ф.* О механизме возникновения регулярного микрорельефа при деформировании полимеров, имеющих жесткое покрытие. Доклады РАН, т.356, N1, с.54, 1997.
- [3] *Волынский А.Л., Воронина Е.Е., Лебедева О.В., Баженов С.Л., Озерин А.Н., Бакеев Н.Ф.* О стадии инициирования регулярного микрорельефа и регулярного разрушения покрытия при деформировании полимера-подложки, ДАН, 1998, том 360, N 3, с. 349—352.; A.L. Volynsky, E.E. Voronina, O.V. Lebedeva, S.L. Bazhenov, A.N. Ozerin, N. F. Bakeev. Plastic Strain of a Metallic Coating in Deforming a Polymer Support, Doklady Physical Chemistry, 1998, V. 360, N 3, p.151.
- [4] *Belyaev V., Misnik V., Trofimov S., Volynski A., Kononov V., Muravski A.* Generation of periodic microrelief in tensioned polymeric substrates with hard coating and their physical properties // Applied Physics Letters, V. 86, No. 1 P.011904 2005.
- [5] *Volynsky A.L., Voronina E.E., Belyaev V.V., Bazhenov S.L., Ivanov S.A., Chistovskaya L.V.* Fabrication of Plastic Substrates with Controlled Relief for Optical Components and Light Weight FPD // 6th International Display Workshops IDW'99, Sendai, Japan, December 1—3, 1999, p. 69—72.
- [6] *Belyaev V.V., Tsoy V., Volynskii A., Bakeev N., Ivanov S., Chistovskaya L.* New Polymer Material For The Diffraction Gratings Substrates // Proceedings of The 1st International Display Manufacturing Conference IDMC 2000. Seoul, Korea. P. 293—295 (2000).
- [7] *Volynsky A.L., Voronina E.E., Belyaev V.V., Bazhenov S.L., Ivanov S.A.* Preparation of plastic substrates with controlled relief for liquid crystal alignment // Proc. SPIE. Vol. 4147 (Liquid Crystals: Chemistry, Physics and Applications). P. 256—260 (2000).
- [8] *Бакеев Н.Ф., Беляев В.В., Волынский А.Л., Иванов С.А., Коновалов В.А., Муравский А.А., Минько А.А., Чистовская Л.В., Яковенко С.Е.* Изготовление полимерных подложек с периодическим микрорельефом и исследование их оптических свойств // Оптический журнал. Т. 68. № 9. С. 89—75 (2001).
- [9] *Belyaev V.V., Chistovskaya L.V., Kononov V.A., Trofimov S.M., Volynsky A.L.* Liquid crystal alignment on polymeric substrates with periodic microrelief obtained by stretching method // Proceedings of The 2nd International Display Manufacturing Conference IDMC 2002, Seoul, Korea, p. 321—322 (2002).
- [10] *Belyaev V.V., Chistovskaya L., Kononov V., Muravsky A., Tarasishin A., Trofimov S., Tsoy V., Volynsky A., Yakovenko S.* Physical properties of stretched polymeric substrates with periodic microrelief for optical diffraction elements and liquid crystals alignment // Journal of the SID. V. 11. P. 3—13 (2003).
- [11] *Margaryan H.L.* Some Peculiarities of Transient Processes in Planar Periodic—Planar Polarization Diffraction Gratings// Molecular Crystals and Liquid Crystals, v. 553, p. 5—12, 2012.

- [12] *Margaryan H.L., Aroutiounian V.M., Hovhannisyan D.L., Hakobyan N.H., Abrahamyan V.K.* Some Peculiarities of the Recording of Polarization Diffraction Gratings by Doubling Method // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, v. 559, p. 214—227, 2012.
- [13] *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. 2-е изд. М.: Наука, 1973, гл. 8, стр. 341—345, 362—372.
- [14] *Ландсберг Г.С.* Оптика: учеб. пособие. 6-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
- [15] *Цой В.И., Тарасишин А.В., Беляев В.В., Трофимов С.М.* Моделирование дифракции света на структурах с пространственной периодичностью оптических параметров вещества и рельефа поверхности // *Оптический журнал*. 2003, Т. 70. № 7. С. 18—23.
- [16] *Tsoy V., Belyaev V., Misnik V., Litovchenko D., Tarasishin A.* Simulation of light propagation through birefringent substrates with periodical surface microrelief // *Optics Communications*. V. 246. No. 1—3. P. 57—66 (2005).
- [17] *Belyaev V.V., Tsoy V.I., Kushnir E.M., Klyckov A.V., Kalashnikov A.Y.* Polarized light diffraction on anisotropic substrates with rectangular and sine microrelief // *Journal of the SID*. V. 13, p. 305 (2005).
- [18] *Беляев В.В., Кушнир Е.М., Клыков А.В., Цой В.И.* Численное моделирование дифракции света на периодических анизотропных решетках с поверхностным прямоугольным микро-рельефом // *Оптический журнал*. 2005, Т. 72. С. 86—90.
- [19] *Belyaev V.V., Novikovich V.M., Denisenko P.L.* Diffraction on Birefringent Elements with Sine Surface Microrelief // *Journal of the SID*. 2008, V. 16. P. 961—967.

AUTOMATED SYSTEM FOR MEASURING THE PARAMETERS OF DIFFRACTION ON POLYMER FILMS WITH PERIODIC MICRORELIEF

**V.V. Belyaev^{1,2}, K.V. Savtsov¹, S.V. Moiseyenko¹,
A.A. Gorbunov¹, I.V. Popov³, A.L. Volynsky⁴, K.A. Pupkov¹,
H.L. Margaryan⁵, A.S. Solomatin², N.A. Bunkina⁶**

¹ People Friendship University of Russia

² Moscow Regional State University

³ Central Research Institute “Comet”

⁴ Faculty of Chemistry

Moscow State University MV University

⁵ Yerevan State University

⁶ Moscow Aviation Institute (National Research University)

An automated system for measuring the diffraction efficiency of light, as well its kinematic scheme, were designed and assembled. The measurements of the diffraction efficiency of light on the sample of polymeric substrates with periodic microrelief were carried out. The software is developed in Matlab environment for the construction of the diffraction pattern of the geometric parameters and wavelength. By using software as well as the results of measurement of the light diffraction efficiency the microrelief period was determined too. The correctness of the period was checked by an independent method.

Key words: automated complex, polymer substrate, the diffraction efficiency of light, measurement parameters.

REFERENCES

- [1] Volynsky A.L., Bakeev N.F. Structural self-organization of amorphous polymers. Moscow: Fizmatlit, 2005. p. 232.
- [2] Bazhenov S.L., Chernov I.V., Volynsky A.L., Bakeev N.F. Mechanism of the Formation of the Regular Microrelief in Deformation of Polymer Films with Hard Coatings. *Doklady Physical Chemistry*, V. 356, N 1, p. 283, 1997.
- [3] Volynsky A.L., Voronina E.E., Lebedeva O.V., Bazhenov S.L., Ozerin A.N., Bakeev N.F. Plastic Strain of a Metallic Coating in Deforming a Polymer Support, *Doklady Physical Chemistry*, 1998, V. 360, N 3, p. 151.
- [4] Belyaev V., Misnik V., Trofimov S., Volynski A., Konovalov V., Muravski A. Generation of periodic microrelief in tensioned polymeric substrates with hard coating and their physical properties // *Applied Physics Letters*, V. 86, No. 1 P.011904 2005.
- [5] Volynsky A.L., Voronina E.E., Belyaev V.V., Bazhenov S.L., Ivanov S.A., Chistovskaya L.V. Fabrication of Plastic Substrates with Controlled Relief for Optical Components and Light Weight FPD // 6th International Display Workshops IDW'99, Sendai, Japan, December 1—3, 1999, p. 69—72.
- [6] Belyaev V.V., Tsoy V., Volynskii A., Bakeev N., Ivanov S., Chistovskaya L. New Polymer Material For The Diffraction Gratings Substrates // *Proceedings of The 1st International Display Manufacturing Conference IDMC 2000*. Seoul, Korea. P. 293—295 (2000).
- [7] Volynsky A.L., Voronina E.E., Belyaev V.V., Bazhenov S.L., Ivanov S.A. Preparation of plastic substrates with controlled relief for liquid crystal alignment // *Proc. SPIE*. Vol. 4147 (Liquid Crystals: Chemistry, Physics and Applications). P. 256—260 (2000).
- [8] Bakeev N.F., Belyaev V.V., Volynsky A.L., Ivanov S.A., Konovalov V.A., Muravsky A.A., Minko A.A., Chistovskaya L.V., Yakovenko S.E.. Fabricating polymeric substrates with periodic microrelief and investigating their optical properties // *Journal of Optical Technology*, Vol. 68 Issue 9, pp. 89—75 (2001).
- [9] Belyaev V.V., Chistovskaya L.V., Konovalov V.A., Trofimov S.M., Volynsky A.L. Liquid crystal alignment on polymeric substrates with periodic microrelief obtained by stretching method // *Proceedings of The 2nd International Display Manufacturing Conference IDMC 2002*, Seoul, Korea, p. 321—322 (2002).
- [10] Belyaev V.V., Chistovskaya L., Konovalov V., Muravsky A., Tarasishin A., Trofimov S., Tsoy V., Volynsky A., Yakovenko S. Physical properties of stretched polymeric substrates with periodic microrelief for optical diffraction elements and liquid crystals alignment // *Journal of the SID*. V. 11. P. 3—13 (2003).
- [11] Margaryan H.L. Some Peculiarities of Transient Processes in Planar Periodic—Planar Polarization Diffraction Gratings // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, v. 553, p. 5—12 (2012).
- [12] Margaryan H.L., Aroutiounian V.M., Hovhannisyan D.L., Hakobyan N.H., Abrahamyan V.K. Some Peculiarities of the Recording of Polarization Diffraction Gratings by Doubling Method // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, v. 559, p. 214—227 (2012).
- [13] Born M., Wolf E. *Principles of Optics*. 2nd ed. M.: Science, 1973, ch. 8, pp. 341—345, 362—372.
- [14] Landsberg G.S. *Optics. Tutorial: For universities*. 6th izd. M.: FIZMATLIT, 2003, ch. 7 str. 150—172; Ch. 9, pp. 158—175; Ch. 12, pp. 347—351, Sec. 26.
- [15] Tsoy V.I., Tarasishin A.V., Belyaev V.V., Trofimov S.M. Modelling the diffraction of light by structures with spatial periodicity of the optical parameters of the substance and of the surface relief // *Journal of Optical Technology*, Vol. 70 Issue 7, pp. 465—469 (2003).
- [16] Tsoy V., Belyaev V., Misnik V., Litovchenko D., Tarasishin A. Simulation of light propagation through birefringent substrates with periodical surface microrelief // *Optics Communications*, V. 246, No. 1—3, p. 57—66 (2005).
- [17] Belyaev V.V., Tsoy V.I., Kushnir E.M., Klyckov A.V., Kalashnikov A.Y. Polarized light diffraction on anisotropic substrates with rectangular and sine microrelief // *Journal of the SID*. V. 13, p. 305 (2005).

- [18] Belyaev V.V., Kushnir E.M., Klyckov A.V., Tsoy V.I. Numerical modeling of the diffraction of light at periodic anisotropic gratings with rectangular surface microrelief // *Journal of Optical Technology*, Vol. 72 Issue 9, pp. 725—728 (2005).
- [19] Belyaev V.V., Novikovich V.M., Denisenko P.L. Diffraction on Birefringent Elements with Sine Surface Microrelief // *Journal of the SID*. 2008, V. 16. P. 961—967.