

Комбинированный защитный элемент на основе распределённого Брэгговского отражателя и рельефно-фазовой голограммы

А. В. Раздобарин, Л. И. Смирнов

АО «НПО «КРИПТЕН» Дубна, Россия

Представлен новый оптический защитный элемент, представляющий собой комбинацию Брэгговского отражателя и голографического изображения. В зависимости от конфигурации отражателя данный элемент может иметь высокие коэффициенты отражения в широком или узком оптическом спектре, а также обладать цветопеременным эффектом как в отраженном, так и в проходящем свете. На основе результатов моделирования структуры комбинированного защитного элемента, состоящего из распределённого Брэгговского отражателя и голографического изображения изготовлены экспериментальные образцы.

Ключевые слова: Голография, Защитный элемент, Цветопеременный эффект, Брэгговский отражатель.

Цитирование: **Раздобарин, А. В.** Комбинированный защитный элемент на основе распределённого Брэгговского отражателя и рельефно-фазовой голограммы / А. В. Раздобарин, Л. И. Смирнов // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 289–294.

Введение

Актуальность работы определяется интенсивно растущим интересом к защитным оптическим элементам, которые можно наблюдать не вооруженным глазом. В последние годы такой интерес был обусловлен технологической сложностью изготовления и невозможностью их воспроизведения при отсутствии специального оборудования.

Практическая ценность работы заключается в изготовлении голографических прозрачных цветопеременных защитных элементов с отражающим покрытием, обладающим высоким коэффициентом отражения, а также меняющим цвет отражения и пропускания при наклоне.

Предлагаемое в данной работе решение по изготовлению прозрачных защитных элементов с отражающим покрытием основано на базе четверть волнового зеркала (распределённый Брэгговский отражатель) в комбинации с голографическим защитным изображением.

Целью данной работы являлось: изготовление прозрачных цветопеременных голографических образцов, где в качестве зеркала использовался распределённый Брэгговский отражатель и рельефно-фазовая голограмма; оценка оптических свойств изделия (яркости, цветов отражения и пропускания).

При моделировании структуры комбинированного защитного элемента использовался распределённый Брэгговский отражатель (РБО), также известный как одномерный фотонный

кристалл, чаще всего представляющий собой последовательность двух или более осажденных друг на друга материалов с разными показателями преломления, как показано на рис. 1.

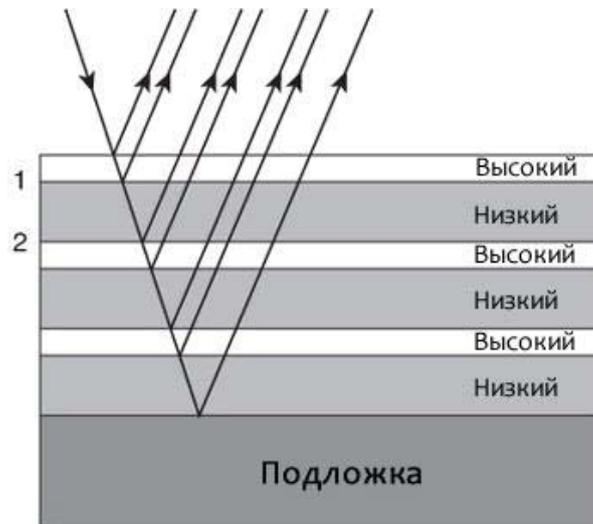


Рис. 1. Структура РБО

Электромагнитная волна, распространяясь перпендикулярно слоям РБО, приведённого на рис. 1, испытывает отражения от границ раздела сред с показателями преломления n_H и n_L . Закон Брэгга определяет условия, при которых волны, отражённые от границ раздела сред данного РБО при перпендикулярно падающей волне, находятся в одинаковой фазе [1]:

$$\Lambda = \frac{l\lambda_b}{2n_{eff}} \quad (1)$$

где Λ – период РБО, $l = 1, 2, 3, \dots$ целое число, указывающее на порядок дифракции, λ_b – длина волны, n_{eff} – эффективный показатель преломления РБО.

$$n_{eff} = 2 \left(\frac{1}{n_H} + \frac{1}{n_L} \right)^{-1} \quad (2)$$

Электромагнитная волна, распространяясь перпендикулярно слоям РБО, испытывает отражения от границ раздела сред с показателями преломления n_H и n_L . Условие Брэгга – Вульфа определяет условия, при которых волны, отражённые от границ раздела сред данного РБО при перпендикулярно падающей волне, находятся в одинаковой фазе [2].

Так, для РБО, изображённого на рис. 1, толщины слоев с большим показателем преломления n_H и с меньшим показателем преломления n_L рассчитывается соответственно, как:

$$t_H = \frac{\lambda}{4n_H} \quad (3)$$

$$t_L = \frac{\lambda}{4n_L} \quad (4)$$

Тогда, коэффициент отражения РБО на длине волны λ_b будет равен [3]:

$$|r| = \left(\frac{1 - \left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{2m}}{1 + \left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{2m}} \right)^2 \quad (5)$$

где m – число пар четвертьволновых слоев, из которых состоит РБО.

Максимум коэффициента отражения РБО в спектре приходится на длину волны λ_b , и его спектральная ширина определяется из выражения:

$$\Delta\lambda = \frac{2\lambda_b \Delta n}{\pi n_{eff}} \quad (6)$$

где Δn – разница показателей преломления n_H и n_L , n_{eff} – эффективный показатель преломления РБО.

На границе между слоями с разными показателями преломления падающий пучок отражается. Отраженные части имеют сдвиг по фазе в 180° в том случае, если свет перешел из слоя с меньшим показателем преломления n_L в слой с большим коэффициентом преломления n_H . Относительная разность фаз всех отраженных лучей либо нулевая, либо кратна полному обороту в 360° – тогда наблюдается явление интерференции (см. рис. 1) [4].

Для адаптации такого рода конструкции к имеющимся технологическим возможностям предприятия был произведен расчет и оценка ожидаемых эффектов.

В опытных образцах в качестве материала с высоким коэффициентом преломления был использован ZnS (сульфид цинка), а в качестве материала с низким Na₃AlF₆ (криолит) (см. рис. 2).

Расчетные спектры показывали, что возможно создание зеркала состоящего из трех слоев (Na₃AlF₆ 100 нм между ZnS 44 нм) с коэффициентом отражения 73 % в верхнем экстремуме на длине волны 450 нм. При этом увеличение толщины Na₃AlF₆ приводило к смещению оптического резонанса и возможности получить различные интерференционные цвета отражения зеркала, а также цветопеременные покрытия, работающие как на просвет, так и на отражение.

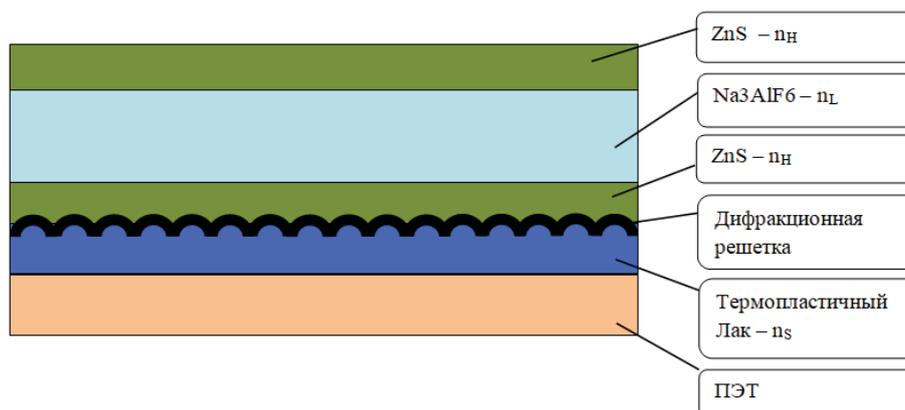


Рис. 2. Конструкция изделия

В качестве подложки использовался ПЭТ с нанесенным термопластичным лаком, по которому производилось тиснение никелевой матрицей с рельефно-фазовой голограммой. Затем последовательно, путем терморезистивного распыления в вакууме, наносились слои Брэгговского отражателя: ZnS (сульфид цинка), Na₃AlF₆ (криолит) и ZnS (сульфид цинка). С помощью спектрометра в реальном времени контролировался спектр отражения покрытия.

Полученные оптические элементы имели помимо голографического изображения высокий коэффициент отражения (63 % отражения при оптической плотности 0,3 OD), а также такие защитные признаки как: изменение цвета отражения при наклоне (из пурпурного в зеленый), изменение цвета пропускания при наклоне (из зеленого в красный), различающиеся цвета при отражении и пропускании (отражение пурпурный, на просвет зеленый).

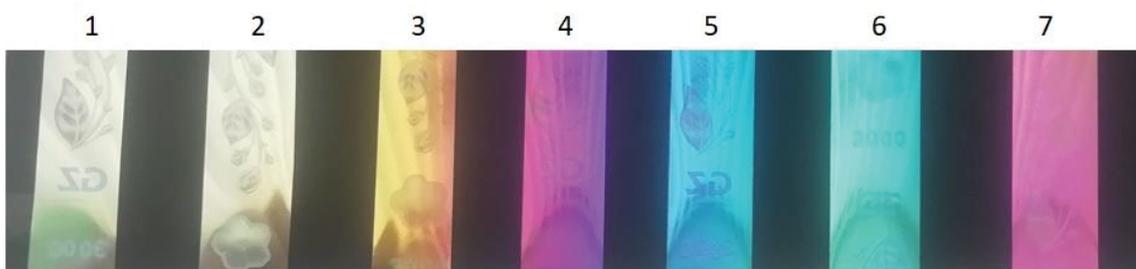


Рис. 3. Цвет отражения образцов

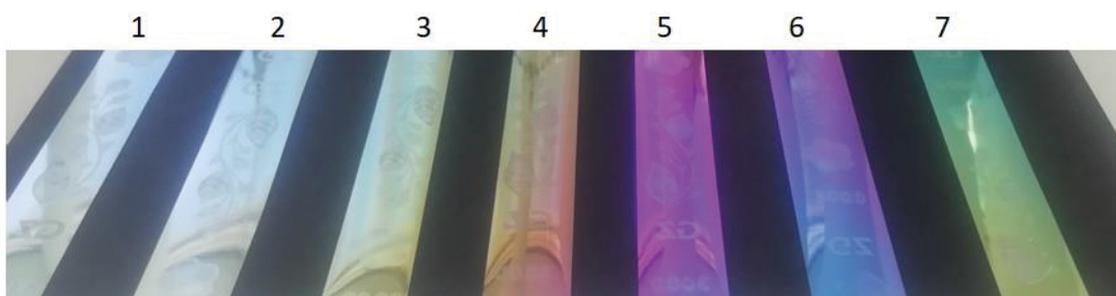


Рис. 4. Цвет отражения при наклоне образцов



Рис. 5. Цвет образцов на просвет

Расчетные и фактически измеренные спектры на отражение и на просвет, на примере образца №7, приведены ниже на рис. 6.

Цвет отражения и пропускания меняется в зависимости от толщины нанесения слоев. Сводные данные приведены в таблице 1 ниже.

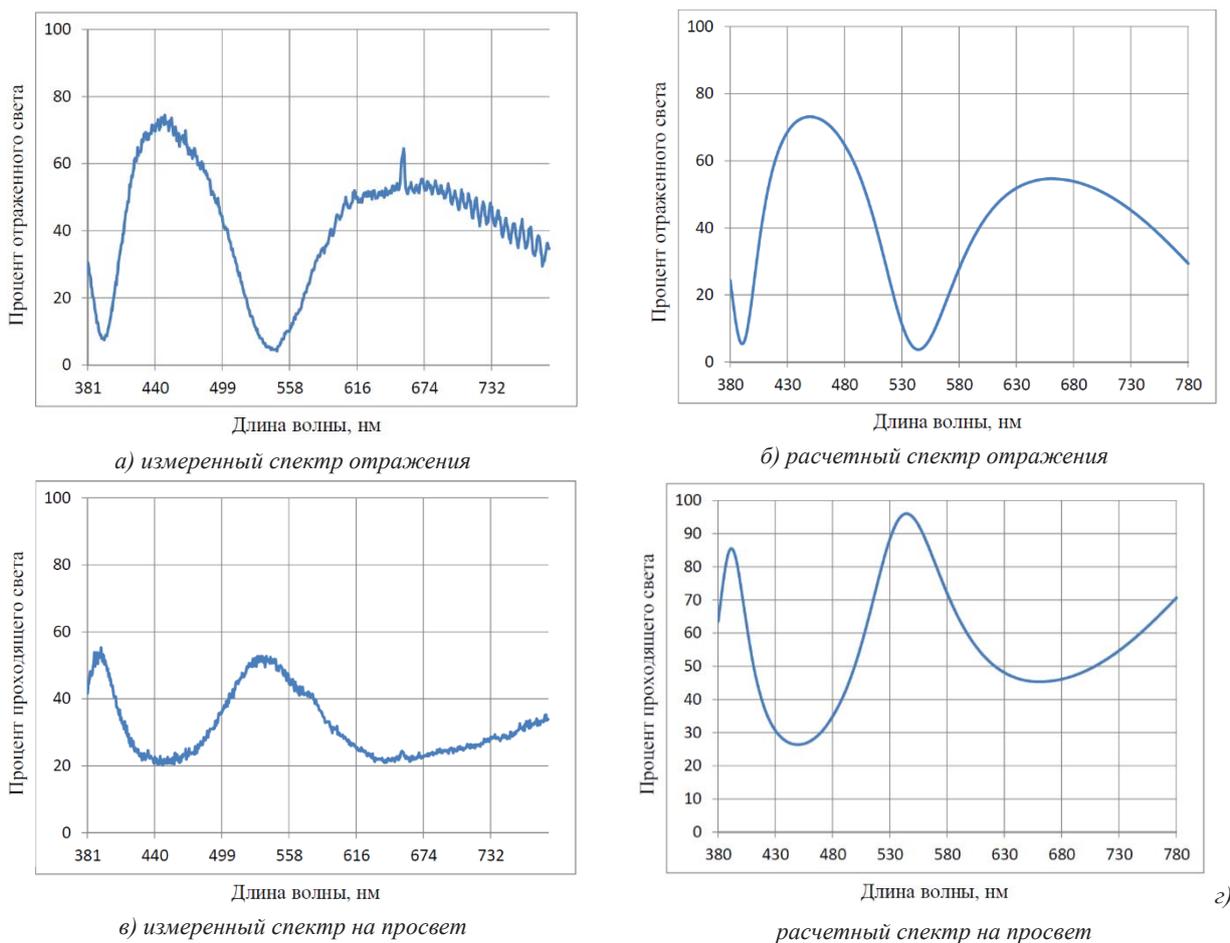


Рис. 6. Расчетные и фактически измеренные спектры образца №7

Таблица 1. Сводные данные физических величин по образцам

Номер образца	Отражение R, %	Оптическая плотность OD	Физическая толщина Na ₃ AlF ₆	Цвет отражения	Цвет на просвет	Цветопеременный эффект
1	62	0,30	110 нм	серебристый	фиолетовый	серебристый прозрачный
2	60	0,31	120 нм	серебристый	фиолетовый	серебристый прозрачный
3	не измерялось	не измерялось	140 нм	желтый	синий	желтый серебристый
4	не измерялось	не измерялось	190 нм	фиолетовый	зеленый	фиолетовый желтый
5	не измерялось	не измерялось	220 нм	синий	оранжевый	синий фиолетовый
6	не измерялось	не измерялось	280 нм	сине-зеленый	красный	синий фиолетовый
7	не измерялось	не измерялось	420 нм	Красно-розовый	зеленый	розовый зеленый

Заключение

В работе предложен способ расчета и изготовления оптических защитных элементов. Показано что, в зависимости от конфигурации отражателя данные элементы могут демонстрировать высокие коэффициенты отражения в широком или узком оптическом

спектре, а также обладать цветопеременным эффектом, как в отраженном, так и в проходящем свете.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Yariv, A.** Periodic structures for integrated optics / A. Yariv, M. Nakamura // IEEE Quantum Electronics. — 1977 — Vol. 13. — № 4. — P. 233—253.
- [2] **Манцызов, Б. И.** Когерентная и нелинейная оптика фотонных кристаллов — М.: ФИЗМАТЛИТ, 1999. — 208 с.
- [3] **Wilmsen, C.** Vertical-cavity surface-emitting lasers / C. Wilmsen, H. Temkin, and L.A. Coldren // Cambridge Studies in Modern Optics. — 1999. — P.73.
- [4] **Окатов, М.А.** Справочник технолога-оптика / М.А. Окатов, Э.А. Антонов, А. Байгожин и др.; Под ред. М.А. Окатова — 2-е изд., перераб. и доп. — СПб.: Политехника, 2004. — 679 с.

A combined protective element based on a distributed Bragg reflector and a relief-phase hologram

A. V. Razdobarin, L. I. Smirnov

JSC RPC KRYPTEN, Dubna, Russia

A new optical security element is presented, which is a combination of a Bragg reflector and a holographic image. Depending on the configuration of the reflector, this element can have high reflection coefficients in a wide or narrow optical spectrum, as well as have a color-changing effect in both reflected and transmitted light. Based on the results of modeling the structure, samples consisting of a distributed Bragg reflector and a holographic image were produced.

Keywords: Holography, Security element, Color-shifting effect, Bragg reflector.