

МЕТОД РАСЧЁТА ДИФРАКЦИОННОГО ДЕЛИТЕЛЯ ПУЧКОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СО СПЕКТРАЛЬНОЙ СЕЛЕКЦИЕЙ НА ОСНОВЕ БИХРОМИРОВАННОЙ ЖЕЛАТИНЫ

А.В. Горноста́й, С.Б. Оди́нок

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет), Москва, Россия

Аннотация

В статье представлен расчёт параметров дифракционного делителя пучка лазерного излучения. Расчёт выполнен для фазового дифракционного оптического элемента на основе бихромированной желатины, применяемого с целью формирования освещающего пучка от «белого» лазера в три пучка лазерного излучения на различных длинах волн.

Ключевые слова: бихромированная желатина, делитель пучков, трёхмерные голограммы, объёмные голограммы, цветоделитель, светоделитель.

Цитирование: Горноста́й, А.В. Метод расчёта дифракционного делителя пучков лазерного излучения со спектральной селекцией на основе бихромированной желатины / А.В. Горноста́й, С.Б. Оди́нок // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 1. – С.45-50. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-1-45-50.

Введение

Целью работы является разработка методики расчёта дифракционного делителя пучка (ДДП), предназначенного для деления и фокусирования в одинаковые фокальные области освещающего пучка (или пучков) лазерного излучения, а также их селекции на три различные спектральные компоненты. В качестве источника излучения рассматривается лазерная установка, генерирующая излучение на нескольких длинах волн (RGB-лазер [1]), а носителем ДОЭ является стеклянная пластина со слоем бихромированной желатины (БХЖ).

Такой ДДП можно использовать в голографических прицелах [2], голографических индикаторах знакосимвольной информации, в оптико-электронных приборах при формировании специальных калибровочных опорных точек [3, 4]. В этих устройствах часто требуется создание многоцветных изображений, например, изображения прицельных знаков красного и зелёного цветов. Активно используются ДДП в спектрометрах в качестве диспергирующих элементов [5].

Кроме того, такие ДДП могут использоваться для создания объектного и опорного пучков в голографии и интерферометрии, формирования массива точек, для деления света на пучки с разной поляризацией, для многопучкового освещения LCD-матриц, для создания многофокусных линз, делителей фемтосекундных пучков и т.д. [6–9]. Известны такие светоделители, как куб-призма, плоскопараллельная пластинка, дифракционный светоделитель и светоделитель с плавной перестройкой коэффициента светоделения [10–12]. Недостатком куб-призмы и плоскопараллельной пластинки является сложность изменения коэффициента светоделения и угла дифракции лучей, а недостатком дифракционного светоделителя является невозможность регулирования соотношения энергий пучков. Недостатком светоделителя с плавным изменением коэффициента светоделения является невозможность изменения угла дифракции лучей в требуемом диапазоне. В разделе 5.4 книги [13] рассматриваются спектральные делители на основе би-

нарных и многоуровневых ДОЭ (киноформ) с большой высотой ступенек, что приводит к сложностям их технологической реализации.

Для разложения света в спектр используются призмы, интерферометры Фабри–Перо и дифракционные решётки. Из-за своей высокой дисперсии дифракционные решётки получили большое распространение [6–8].

Особенностями рассматриваемого в данной статье ДДП лазерного пучка является то, что он записывается в виде объёмной голограммы, в которой угол дифракции лучей и коэффициент светоделения определяются номером матричной ячейки, на которую попал считывающий луч. В зависимости от значения коэффициента светоделения свет разлагается на 0-й и 1-й порядки дифракции. Таким образом, для RGB-лазера пучок света делится в общем случае на 6 пучков: три из них (R_0 , G_0 и B_0) идут в 0-й порядок дифракции, остальные 3 (R_1 , G_1 и B_1) идут в 1-й порядок дифракции по заданному разработчиком направлениям.

1. Описание процесса дифракции на Брэгговских решётках в объёмной голограмме

Рассмотрим две плоские волны единичной амплитуды (рис. 1), интерференция которых наблюдается в плоскости yz [13, 14]. Согласно закону Снеллиуса

$$\frac{\sin \Omega_S}{\sin \Psi_S} = \frac{\sin \Omega_R}{\sin \Psi_R} = n, \quad (1)$$

где n – показатель преломления регистрирующей среды, Ω_S и Ω_R – углы между направлениями распространения волн и осью z в воздухе, Ψ_S и Ψ_R – соответствующие углы в регистрирующей среде. Комплексная амплитуда в среде имеет вид

$$a(y, z) = \exp[-i2\pi(\eta_S y + \xi_S z)] + \text{к.с.}, \\ a^* = I = 2 + 2 \cos\{2\pi[(\eta_S - \eta_R)y + (\xi_S - \xi_R)z]\}, \quad (2)$$

где $\eta_S = \sin \Psi_S / \lambda$, $\eta_R = \sin \Psi_R / \lambda$,

$$\xi_S = \sqrt{1 - \lambda^2 \eta_S^2} / \lambda, \quad \xi_R = \sqrt{1 - \lambda^2 \eta_R^2} / \lambda$$

и λ – длина волны света в среде.

Полагая, что среда обладает фоточувствительностью только в плоскости $z = z_1 = \text{const}$, второй член в аргументе косинуса в (2) $(\xi_s - \xi_r)z_1$ в плоскости z_1 представляет собой постоянную, которую можно не учитывать.

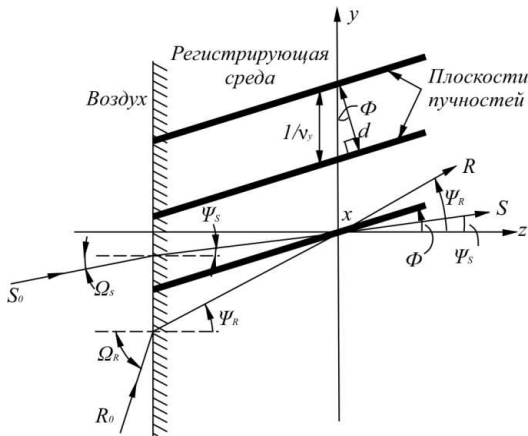


Рис. 1. Образование объёмной голограммы.

В регистрирующей среде образуются плоскости пучностей из-за интерференции световых пучков, Ω_s и Ω_r – углы между направлениями распространения волн и осью z в воздухе, ψ_s и ψ_r – соответственно углы в регистрирующей среде, d – период решётки, $1/\nu_y$ – период решётки вдоль оси y

Поверхности пучностей описываются уравнением $2\pi(\eta_s - \eta_r)y + 2\pi(\xi_s - \xi_r)z = \text{const}$. (3)

Оставшееся слагаемое соответствует фазовому члену, определяющему частоту интерференционных полос в направлении y :

$$\nu_y = 1/d_y = \eta_s - \eta_r = (\sin \psi_s - \sin \psi_r) / \lambda, \quad (4)$$

где d_y – расстояние между соседними максимумами распределения интенсивности в направлении y .

Угол ϕ между плоскостью пучностей и осью z определяется с помощью дифференцирования по z (3)

$$(\eta_s - \eta_r) \frac{dy}{dz} + (\xi_s - \xi_r) = 0, \quad (5)$$

$$\text{tg } \phi = \frac{dy}{dz} = - \frac{\xi_s - \xi_r}{\eta_s - \eta_r}.$$

Преобразовав (5), получим

$$\text{tg } \phi = - \frac{\sqrt{1 - \sin^2 \psi_s} - \sqrt{1 - \sin^2 \psi_r}}{\sin \psi_s - \sin \psi_r} = \text{tg} \left(\frac{\psi_s + \psi_r}{2} \right). \quad (6)$$

Таким образом, поверхности пучностей элементарной голограммы делят пополам угол между волновыми векторами интерферирующих волн.

Перейдя к углу θ , которым обозначается угол между пучком и плоскостью пучностей в среде, получим

$$d = d_y \cos \phi = - \frac{\cos \phi}{\eta_s - \eta_r}. \quad (7)$$

На рис. 2 показано поперечное сечение элементарной объёмной голограммы [14]. В таких объёмных

голограммах каждый луч последовательно рассеивается от большого числа периодически расположенных максимумов плотности среды. Так как рассеянные волны интерферируют, для исключения их затухания они должны быть синфазны.

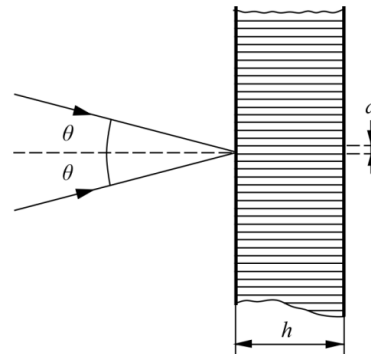


Рис. 2. Схема записи объёмной голограммы. Вследствие интерференции двух пучков света в среде образуются плоскости пучностей, θ – угол между лучом и нормалью к поверхности, h – толщина фотоносителя, d – период голограммы

Пропускание голограммы зависит от длины волны света и угла падения интерферирующих пучков, коэффициент светоделения определяется временем экспонирования, а угол дифракции определяется формулой Брэгга (рис. 2) [14].

$$2d \sin \theta = \lambda / n, \quad (8)$$

где d – период решётки, θ – угол между пучком и плоскостью пучностей в светочувствительной среде, λ – длина волны в воздухе, n – средний показатель преломления в среде.

Чтобы можно было варьировать угол дифракции лучей и коэффициент светоделения (на соответствующих длинах волн), можно записать матрицу объёмных субголограмм, например, как это показано на рис. 3.

Угол отклонения луча	60°	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
	55°	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
	50°	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5
	45°	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5
		20%	40%	60%	80%	100%
		Коэффициент светоделения				

Рис. 3. Матрица объёмных субголограмм

Оценим амплитуду $S(T)$ прошедшей через объёмную субголограмму волны. Для диэлектрической фазовой решётки без потерь введём параметры

$$\zeta = \delta \beta T \sin \theta_0 = \Gamma T / 2 \cos \theta_0, \quad (9)$$

$$\nu = \chi T / 2 \cos \theta_0 = \pi n_1 T / 2 \cos \theta_0, \quad (10)$$

где $\Gamma = \delta \beta \sin 2\theta_0$, δ – малое отклонение от θ , $\beta = 2\pi n / \lambda$, χ – постоянная взаимодействия, T – толщина голограммы, n_1 – показатель преломления фоточувствительной среды.

Амплитуда прошедшей волны равна

$$S(T) = -i \frac{\exp(-i\zeta) \sin \sqrt{\zeta^2 + \nu^2}}{\sqrt{1 + \frac{\zeta^2}{\nu^2}}}. \tag{11}$$

Полагая, что амплитуда падающей волны равна 1 при $z=0$ [14], дифракционная эффективность голограммы определяется соотношением

$$\eta = \frac{|S(T)|^2}{|R(0)|^2} = |S(T)|^2. \tag{12}$$

Рассмотрим случай падения под углом Брэгга полагая, что $\delta=0$ и $\zeta=0$. Эффективность будет равна 1, если $\sin \nu = 1$ или

$$\nu = \frac{\pi n_1 T}{\lambda \cos \theta_0} = \frac{\pi}{2}. \tag{13}$$

Другая форма записи

$$\nu = \frac{n_1 T}{\cos \theta_0} = \frac{\lambda}{2}. \tag{13a}$$

Левая часть равенства (13) эквивалентна приращению оптического пути падающего луча, наблюдаемого в случае, если бы среднее изменение показателя преломления среды голограммы равнялось n_1 . Если эквивалентное изменение длины пути равно половине длины волны падающего излучения (в воздухе), то дифракционная эффективность теоретически будет равна 100%. Однако при угле падения, отличном от угла Брэгга, величина дифракционной эффективности резко уменьшается, что показано на рис. 4.

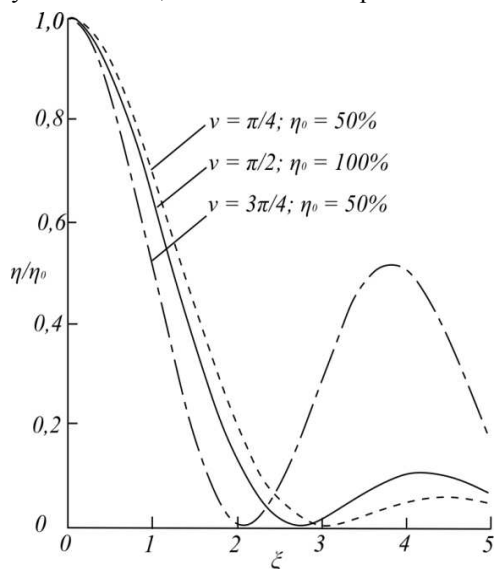


Рис. 4. Зависимость относительной дифракционной эффективности η/η_0 пропускающей объёмной субголограммы от параметра $\zeta = \delta(2\pi n/\lambda)T \sin \theta_0$ для различных значений параметра $\nu = \pi n_1 T / \lambda \cos \theta_0$

По вертикальной оси отложена относительная дифракционная эффективность η/η_0 объёмной субголограммы, а по горизонтальной оси указано отклонение δ от угла Брэгга. Каждая из трёх кривых соответствует модуляционным параметрам ν , равным соответственно $\pi/2$, $\pi/4$ и $3\pi/4$.

2. Схемы получения дифракционного делителя пучка в виде матрицы объёмных субголограмм

Для получения итогового ДДП нужно использовать оптическую схему записи матрицы объёмных субголограмм (рис. 5), в которой объектная волна проходит через вспомогательный транспарант (амплитудный или фазовый) с дифракционными решётками, направляющими продифрагировавшие пучки излучения в требуемые зоны-ячейки будущей матрицы объёмных субголограмм (рис. 3), и падает под требуемым углом на фотопластинку для записи матрицы объёмных субголограмм.

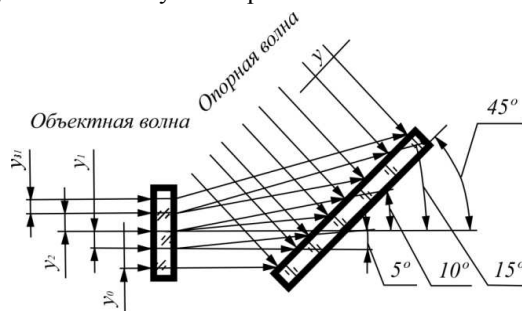


Рис. 5. Запись голограммы. Для записи используется технологическая матрица голограмм, отклоняющая пучки на 0° , 5° , 10° и 15° соответственно. Для снижения требований к технологической голограмме заготовка повернута на 45°

Причём опорная волна падает на фотопластинку по нормали, а сама фотопластинка повернута на 45° к оптической оси. Это сделано для того, чтобы увеличить период интерференционных полос при записи. Чтобы изменять при записи коэффициент светоделиния, можно воспользоваться специализированным клином с переменным коэффициентом пропускания (на рисунке не показан) или изменять время экспозиции участков в матрице объёмных субголограмм.

Запись матрицы объёмных субголограмм выполняется на трёх длинах волн используемого RGB-лазера, однако для каждой матрицы используется свой амплитудный транспарант.

Схема восстановления пучков лазерного излучения на разных длинах волн с одной ячейки матрицы объёмных субголограмм представлена на рис. 6. Пучок излучения от RGB-лазера падает на соответствующую ячейку матрицы субголограмм, дифрагирует на ней и разделяется (отклоняется) в зависимости от того, на какую ячейку он попал. На рис. 6а показано прохождение монохроматического пучка света в 1-й порядок дифракции. На рис. 6б показан вариант дифракции света при освещении ячейки матрицы субголограмм одновременно тремя пучками на различных длинах волн от RGB-лазера. Каждый вариант штриховки соответствует своему пучку лазерного излучения на соответствующей длине волны. Пучки лазерного излучения всех цветов проходят в 0-й порядок с различной интенсивностью, а в 1-м порядке дифракции лазерные пучки с различными длинами волн отклоняются каждый в свою сторону. Относительная интенсивность излучения на различных длинах волн

в 0-м и 1-м порядках определяется дифракционной эффективностью и другими параметрами каждой ячейки в матрице субголограмм.

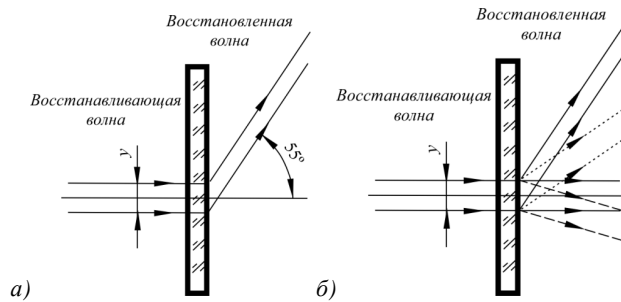


Рис. 6. Схемы дифракции лазерного излучения на одиночной ячейке матрицы объёмных субголограмм, где а) отклонение пучка лазерного излучения на одной длине волны в 1-й порядок дифракции; б) отклонение трёх пучков лазерного излучения на трёх длинах волн также в 1-й порядок дифракции

3. Расчёт параметров дифракционного делителя пучка

Для расчёта использовались данные и параметры наиболее популярных голографических фотопластинок ПФГ-3С (галогенидосеребряные фотопластинки) или ПФГ-4 (фотопластинки со слоем БХЖ), толщина стеклянных подложек которых равна $h_1 = 2,56$ мм. Индекс «к» в формулах обозначает вспомогательный транспарант, выполненный на кварцевой пластинке, а индекс «ж» обозначает в формулах параметры ДДП на БХЖ. Показатели преломления кварцевого стекла: $n_{кр}^k = 1,45654$ и $n_c^k = 1,46632$ указаны для длин волн $\lambda_{кр} = 650$ нм и $\lambda_c = 441$ нм.

Расчёты приведены для углов дифракции пучков лазерного излучения на указанных длинах волн соответственно равных $\beta_0 = 45^\circ, \beta_1 = 50^\circ, \beta_2 = 55^\circ, \beta_3 = 60^\circ$.

Габаритный размер ячейки на вспомогательном транспаранте определяется формулой

$$y_j = y / \cos \beta_j, \tag{14}$$

а периоды дифракционных решёток на вспомогательном транспаранте определяются как

$$d_k = \lambda / \sin(\varphi_{жс} - 45^\circ). \tag{15}$$

Тогда период дифракционных решёток внутри ДДП, выполненного на основе фотопластинки БХЖ, равен

$$d_k = \lambda / \sin \varphi_{жс}. \tag{16}$$

4. Результаты расчётов основных параметров дифракционного делителя пучка

Для оценки требуемых параметров вспомогательного транспаранта в табл. 1 и 2 приведены примеры расчётов для матрицы дифракционных решёток, отклоняющих красный, зелёный и синий луч соответственно. На рис. 3 была приведена карта матрицы объёмных субголограмм (будущего ДДП), а на рис. 5 – процесс записи матрицы объёмных субголограмм для синих, зелёных либо красных пучков лазерного излучения. Так как отклонение синего, зелёного и красного пучков планировалось в одну и ту же

сторону для отдельно взятой ячейки, то схемы процессов записи в этом примере совпадают. На рис. 6а показана работа ячейки в строке 2.

Табл. 1. Значения параметров дифракционных решёток на вспомогательном транспаранте и для отдельных субголограмм в матрице для длины волны $\lambda_{кр} = 650$ нм

Номер участка	0	1	2	3
Угол дифракции, град	45°	50°	55°	60°
Длина участка вспомогательного транспаранта, мм	1,56	3,42	1,1	1,1
Период дифракционных решёток на вспомогательном транспаранте, мкм	-	7,46	3,74	2,51
Период дифракционных решёток на субголограмме, записанной на БХЖ, мкм	0,92	0,85	0,79	0,75

Табл. 2. Значения параметров дифракционных решёток на вспомогательном транспаранте и для отдельных субголограмм в матрице для длины волны $\lambda_3 = 555$ нм

Номер участка	0	1	2	3
Угол дифракции, град	45°	50°	55°	60°
Длина участка вспомогательного транспаранта, мм	1,56	3,42	1,1	1,1
Период дифракционных решёток на вспомогательном транспаранте, мкм	-	6,37	3,20	2,14
Период дифракционных решёток на субголограмме, записанной на БХЖ, мкм	0,78	0,72	0,68	0,64

Табл. 3. Значения параметров технического ДОО и ДОО на БХЖ для длины волны $\lambda_c = 441$ нм

Номер участка	0	1	2	3
Угол дифракции, град	45°	50°	55°	60°
Длина участка вспомогательного транспаранта, мм	1,56	3,42	1,1	1,1
Период дифракционных решёток на вспомогательном транспаранте, мкм	-∞	5,06	2,54	1,70
Период дифракционных решёток на субголограмме, записанной на БХЖ, мкм	0,62	0,58	0,54	0,51

Выводы

Приведена методика расчёта дифракционного делителя пучков лазерного излучения со спектральной селекцией, выполненного в виде матрицы объёмных субголограмм, записанных на фотопластинках с бихромированной желатиной. Дан пример расчёта основных параметров матрицы субголограмм, рассмотрены схема записи матрицы объёмных субголограмм и схема дифракции пучков лазерного излучения на трёх длинах волн работы при использовании RGB-лазера. Расчёт проведён для углов дифракции, равных 45°, 50°, 55° и 60°, при падении пучков лазерного излучения на трёх длинах волн, приведён вариант создания дифракционной ячейки для деления компонент светового пучка по амплитуде на 0-й и 1-й порядки дифракции и в зависимости от длины волны излучения. Данная методика расчётов позволяет усовершенствовать голограммные и дифракционные оптические элементы, используемые в голографических прицелах и индикаторах знако-символьной информации, при формировании в них многоцветных изображений, например, изображений прицельных знаков красного и зелёного цветов.

Авторы предполагают в последующей работе провести цикл соответствующих экспериментальных исследований по изготовлению такого ДДП для RGB-лазера и надеются подтвердить полученные расчётные параметры.

Благодарности

Данная работа выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках соглашения №14.577.21.0115 (идентификатор проекта RFMEFI57714X0115).

Литература

1. **Zhang, Y.** Demonstration of a home projector based on RGB semiconductor lasers // Y. Zhang, H. Dong, R. Wang, J. Duan, A. Shi, Q. Fang, Y. Liu // *Applied Optics*. – Vol. 51(16). – 2012. – P. 3584-3589.
2. **Пат. 95140 Российская Федерация G 02 B 5/23.** Голографический коллиматорный прицел и устройство записи компенсационного голограммного оптического элемента / Одинок С.Б., Ковалёв М.С. [и др.]; опублик. Бюл. № 16, 10.06.2010.
3. **Одинок, С.Б.** Создание ДОО для формирования точечных эталонных изображений в оптических системах / С.Б. Одинок, М.С. Ковалев, Г.Р. Сагателян, А.Б. Соломашенко, Е.А. Дроздова // *Компьютерная оптика*. – 2013. – Т. 37, № 3. – С. 341-351.
4. **Kazanskiy, N.L.** Binary beam splitter / N.L. Kazanskiy, R.V. Skidanov // *Applied Optics*. – 2012. – V. 51(14). – P. 2672-2677. – DOI: 10.1364/AO.51.002672.
5. **Карпеев, С.В.** Исследование дифракционной решётки на выпуклой поверхности как диспергирующего элемента / С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, С.И. Харитонов // *Компьютерная оптика*. – 2015. – Т. 39, № 2. – С. 211-217.
6. **Dammann, H.** Colour separation gratings / H. Dammann // *Applied Optics*. – 1978. – Vol. 17(15). – P. 2273-2279.
7. **Chen, P.-C.** Color separation system with angularly positioned light source module for pixelized backlighting / P.-C. Chen, H.-H. Lin, C.-H. Chen, C.-H. Lee, M.-H. Lu // *Optics Express*. – 2010. – Vol. 18(2). – P. 645-655.
8. **Li, G.** Splitting of femtosecond laser pulses by using a Dammann grating and compensation gratings // G. Li, C. Zhou, E. Dai // *Journal of the Optical Society of America*. – 2005. – Vol. 22(4). – P. 767-772.
9. **Davis, J.A.** Polarizing binary diffraction grating beam splitter / J.A. Davis, G.H. Evans // *Optics Letters*. – 2004. – Vol. 29(13). – P. 1443-1445.
10. **А.с. SU 1053056 А СССР, МПК G 02 B 5/32.** Светоделитель / Дьяченко Н.Г., Мандель В.Е., Тюрин А.В., Нечаева Т.В. (СССР). – 3504124/18-10; заявлено 22.07.82; опублик. 07.11.83, Бюл. №41. – С. 3.
11. **А.с. SU 1826075 А СССР, МПК G 02 B 5/26.** Светоделитель с плавным изменением коэффициента светораспределения / Парусинов В.Г., Беспалько Н.В., Андрищенко В.В., Ешан В.Н. (СССР). – 4856093/10; заявлено 01.08.90; опублик. 07.07.93, Бюл. №25. – С. 2.
12. **Berezny, A.E.** Computer-generated holographic optical elements produced by photolithography / A.E Berezny, S.V. Karpeev, G.V Uspleniev // *Optics and Lasers in Engineering*. – 1991. – Vol. 15(5). – P. 331-340.
13. Дифракционная компьютерная оптика / Д.Л. Головашкин, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.В. Котляр, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Сойфер, С.Н. Хонина; под ред. В.А. Сойфера. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 736 с. – ISBN 5-9221-0845-4.
14. **Кольер Р.** Оптическая голография. / Р. Кольер, К. Беркхарт, Л. Лин; пер с англ. – М.: Мир, 1973. – 421 с.

Сведения об авторах

Горноста́й Алина Владимировна, 1992 года рождения, в настоящее время учится в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана на 6-м курсе по специальности 200201 65 «Лазерная техника и лазерные технологии». Область научных интересов: оптико-голографические системы, контроль качества оптических систем.

Одинок Сергей Борисович, 1950 года рождения, в 1973 году окончил Московское высшее техническое училище им. Н.Э. Баумана (МВТУ, ныне – Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана) по специальности «Оптико-электронные приборы». Доктор технических наук (2011 год), профессор, работает в должности зам. директора по научной работе НИИ Радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана, чл.-корр. Международной академии информатизации. Специалист в области оптико-голографических систем. E-mail: odinokov@bmstu.ru.

*Поступила в редакцию 10 декабря 2015 г.
Окончательный вариант – 11 февраля 2016 г.*

A METHOD TO DESIGN A DIFFRACTIVE LASER BEAM SPLITTER WITH COLOR SEPARATION BASED ON BICHROMATED GELATINE

A.V.Gornostay, S.B. Odinokov
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Abstract

We discuss the computation of parameters of a diffractive beam splitter that uses a diffractive optical element synthesized in a bichromated gelatine to split a white incident laser beam into three different-wavelength beams.

Keywords: bichromated gelatine, color separators, beam splitters, volume gratings.

Citation: Gornostay AV, Odinokov SB. A method to design a diffractive laser beam splitter with color separation based on bichromated gelatine. *Computer Optics* 2016; 40(1): 45-50. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-1-45-50.

Acknowledgements: The work was partially funded under the Agreement with the RF Ministry of Education and Science no. 14.577.21.0115, grant RFMEFI57714X0115.

References

- [1] Zhang Y, Dong H, Wang R, Duan J, Shi A, Fang Q, Liu Y. Demonstration of a home projector based on RGB semiconductor lasers. *Appl Opt* 2012; 51(16): 3584-3589.
- [2] Odínokov SB, Kovalyov MS, et al. Holographic collimator scope and the writing device of the compensator HOE [In Russian]. Pat RF of Invent RU N 95140, F41 G 1/12 of June 10, 2010.
- [3] Odínokov SB, Kovalyov MS, Sagatelyan GR, Solomashenko AB, Drozdova EA. Creation of DOE to form the calibration dot patterns inside the optical systems. *Computer Optics* 2013; 37(3): 341-351.
- [4] Kazanskiy NL, Skidanov RV. Binary beam splitter. *Applied Optics* 2012; 51(14): 2672-2677. DOI: 10.1364/AO.51.002672.
- [5] Karpeev SV, Khonina SN, Kharitonov SI. Study of the diffraction grating on a convex surface as a dispersive element. *Computer Optics* 2015, 39(2): 211-217.
- [6] Dammann H. Colour separation gratings. *Appl Opt* 1978; 17(15): 2273-2279.
- [7] Chen P-C, Lin H-H, Chen C-H, Lee C-H, Lu M-H. Color separation system with angularly positioned light source module for pixelized backlighting. *Opt Express* 2010; 18(2): 645-655.
- [8] Li G, Zhou C, Dai E. Splitting of femtosecond laser pulses by using a Dammann grating and compensation gratings. *J Opt Soc Am* 2005; 22(4): 767-772.
- [9] Davis JA, Evans GH. Polarizing binary diffraction grating beam splitter. *Opt Lett* 2004; 29(13): 1443-1445.
- [10] Diachenko NG, Mandel VE, Turin AV, Nechaeva TV. Beam splitter [In Russian]. Patent SU1053056A USSR, G 02 B 5/32. (USSR), 3504124/18-10; applied 22.07.82; published 07.11.83, Bul. 41: 3.
- [11] Parusinov VG, Bepal'ko NV, Andruschenko VV, Eshan VN (USSR). Beam splitter with gradient index of beam splitting [In Russian]. Patent SU1826075A USSR, G 02 B 5/26, 4856093/10; applied 01.08.90; published 07.07.93, Bul. 25: 2.
- [12] Berezny AE, Karpeev SV, Uspleniev GV. Computer-generated holographic optical elements produced by photolithography. *Optics and Lasers in Engineering* 1991; 15(5): 331-340.
- [13] Soifer VA, ed. *Diffraction computer optics* [in Russian]. Moscow: "Fizmatlit" Publisher; 2007.
- [14] Collier R, Berkhart K, Lin L. *Optical Holography*. NY: Academic press; 1971.

Authors' information

Alina Vladimirovna Gornostay (b. 1992) study at Bauman Moscow State Technical University, laser technics and laser technologies. Her research interests are currently focused on optical holography systems.

Sergey Borisovich Odínokov (b. 1950) graduated (1973) from Moscow Higher Technical School (presently, Moscow State Technical University named after Bauman), majoring in Optoelectronic Devices. He received his Doctor of Technical Sciences (2011) degree from Bauman Moscow State Technical University. Occupies the position of deputy director of Laser and Optoelectronic Systems department of BMSTU. Current research interests include the optical holographic systems. E-mail: odinokov@bmstu.ru.

Received December 10, 2015. The final version – February 11, 2016.
