

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.11.5>

УДК: 535.4 (076.5)

АНАЛИЗ СВОЙСТВ ИЗБИРАТЕЛЬНОСТИ ОБЪЁМНОЙ ГОЛОГРАММЫ В ГОЛОГРАФИЧЕСКОМ ФОТОННОМ УСТРОЙСТВЕ

А. Г. Прыгунов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Донской государственный технический университет (ФГБОУ ВО ДГТУ),
344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

Статья поступила в редакцию 20 декабря 2021 г.

Аннотация. Показана важность применения радиофотоники в устройствах аппаратуры телекоммуникаций. Описаны место и задачи объёмных голограмм в радиофотонных устройствах. Обоснована актуальность задачи исследования свойств избирательности объёмной голограммы, обуславливающих влияние этой голограммы на параметры светового потока в устройстве радиофотоники. Проведён анализ условий экспонирования объёмной голограммы для формирования структуры страт, обеспечивающей её спектральную и пространственную избирательность к световому потоку. Показан обоснованный выбор типа фотоматериала объёмной голограммы для её использования в конструкции радиофотонного устройства. Представлены вариант оптической схемы для записи объёмной голограммы двумя встречными световыми потоками со сферическими волновыми фронтами и уравнение этой голограммы. Перечислены параметры, определяющие структуру страт объёмной голограммы. Проведён анализ условий реконструкции оптического поля, экспонированного на объёмной голограмме. Рассмотрены условия оптимальной реконструкции голограммой оптического поля и его деструкции. Представлены диаграммы углов реконструкции оптических полей объёмной отражательной голограммой. Показано, что при падении на объёмную голограмму реконструирующего

светового пучка со сферическим волновым фронтом для того, чтобы обеспечить наибольшее значение энергии реконструированного оптического поля, реконструирующий световой пучок должен быть узконаправленным, а его оптическая ось должна совпадать с одним из направлений оптимальной реконструкции. При этом реконструирующий световой пучок должен находиться между двумя направлениями полной деструкции голограммой оптического поля. Сделан вывод о том, что объёмная голограмма обладает свойствами, как спектральной (к длине волны света), так и пространственной избирательности, что необходимо учитывать при её использовании в радиофотонном устройстве.

Ключевые слова: радиофотоника, объёмная голограмма, структура страт, спектральная и пространственная избирательность, условие Брэгга, оптическое поле, оптимальная реконструкция, деструкция.

Abstract. The importance of the use of radio-photonics in telecommunication equipment is shown. The place and tasks of volumetric holograms in radio-photonics devices are described. The urgency of the problem of studying the properties of selectivity of a volume hologram, which determine the influence of this hologram on the parameters of the light flux in a radio photonics device, has been substantiated. The analysis of the exposure conditions of the volume hologram for the formation of the structure of the striations, providing its spectral and spatial selectivity to the light flux. A reasonable choice of the type of photographic material of a volumetric hologram for its use in the construction of a radio-photonics device is shown. A variant of the optical scheme for recording a volume hologram with two counterpropagating light beams with spherical wave fronts and the equation of this hologram are presented. The parameters that determine the structure of the striations of the volume hologram are listed. The analysis of the conditions for the reconstruction of the optical field exposed on the volume hologram is carried out. Conditions for optimal reconstruction of an optical field by a hologram and its destruction are considered. Diagrams of the angles of reconstruction of optical fields by a volumetric reflective hologram are presented. It is shown that when a reconstructing light beam with a spherical wavefront is incident

on a volume hologram, in order to provide the highest value of the energy of the reconstructed optical field, the reconstructing light beam must be narrowly directed, and its optical axis must coincide with one of the directions of optimal reconstruction. In this case, the reconstructing light beam should be located between the two directions of complete destruction of the optical field. It is concluded that a volume hologram possesses the properties of both spectral (to the wavelength of light) and spatial selectivity, which must be taken into account when using it in a radio-photonic device.

Key words: radiophotonics, volume hologram, structure of striations, spectral and spatial selectivity, Bragg condition, optical field, optimal reconstruction, destruction.

Введение.

Процесс развития человеческой цивилизации обуславливает постоянный рост требований к техническим возможностям телекоммуникационных систем: растёт спрос на сверхбыструю оптическую связь, всё более широкое применение находят оптические конструктивные элементы этих систем, заменяющие их электронные аналоги [1], наблюдается бурное развитие технологий беспроводной связи. Новые научные и технические задачи в развитии телекоммуникационных систем обуславливают потребность в новой элементной базе для их решения. Активно развивается такое научное направление, как радиофотоника, которое представляет собой научно-технические основы и технологии взаимодействия оптического излучения и радиочастотного сигнала в задачах передачи, приема и обработки информации [1, 2], решаемых в телекоммуникационных системах.

Телекоммуникационные системы с использованием устройств радиофотоники имеют широкую область применения [1]: распределённые сети сотовой и спутниковой связи, антенные системы, системы обработки и визуализации сигналов, волоконно-оптические системы передачи, гибридные радиофотонные системы, которые становятся ключевой технологией для обеспечения надёжного функционирования сложных беспроводных сетей будущего поколения. Использование радиофотоники позволяет расширить

функциональные возможности радиоаппаратуры, работающей в СВЧ диапазоне, открываются реальные перспективы для коммутации этих систем с информационно-коммуникационными системами.

Одним из направлений улучшения технических характеристик и расширения функциональных возможностей устройств радиофотоники является использование в их конструкции объёмных голограмм [3-7]. Такие голограммы могут использоваться в качестве конструктивных элементов в устройствах мультиплексирования, демупльтиплексирования и канализации световых потоков, в оптических дефлекторах, устройствах модуляции и демодуляции оптического и радиоизлучения, в оптических аналого-цифровых преобразователях, в анализаторах спектра сигналов и в ряде других устройств [5-7]. Объёмные голограммы могут использоваться в преобразователях параметров световых потоков путём изменения амплитуды, фазы и направления распространения этих потоков, в качестве оптических фильтров, чувствительных элементов систем частотной и фазовой автоподстройки частоты, систем автоматической регулировки усиления [6] и для решения других задач. Известны схемы конкретных радиофотонных устройств, в которых в качестве объёмных голограмм используются объёмные голограммы, экспонированные во встречных световых пучках со сферическими волновыми фронтами [5÷7]. Для технически грамотного использования объёмных голограмм при конструировании устройств радиофотоники необходимо знать и учитывать их основные свойства, определяющие характер влияния этих голограмм на параметры светового потока. Важными свойствами объёмных голограмм, которые влияют на принцип их использования в устройствах радиофотоники, являются свойства спектральной и пространственной избирательности этих голограмм. Задача анализа условий экспонирования и исследования свойств избирательности объёмной голограммы, обуславливающих влияние этой голограммы на параметры светового потока в устройстве радиофотоники, является актуальной.

Целью статьи является исследование физических свойств избирательности объёмных голограмм, определяющих использование этих голограмм в радиофотонных устройствах.

Решаемые задачи:

1. Анализ условий экспонирования объёмной голограммы для формирования структуры страт, обеспечивающей физические свойства её избирательности.

2. Основы физических свойств спектральной и пространственной избирательности объёмной голограммы.

1. Анализ условий экспонирования объёмной голограммы для формирования структуры страт, обеспечивающей физические свойства её избирательности

Структура страт объёмной голограммы, предназначенной для использования в конструкции радиофотонного устройства, зависит от оптической схемы и условий экспонирования этой голограммы, а также от типа используемого голографического фотоматериала [4]. Именно эти факторы полностью определяют структуру страт любой голограммы. Выбор типа фотоматериала определяется требованиями к частотному диапазону оптического излучения, в пределах которого реализуется его максимальная светочувствительность, к его разрешающей способности и дифракционной эффективности экспонированной голограммы, требованиями к уровню шумов при записи голограммы и в реконструированном световом потоке.

В настоящее время для записи объёмных голограмм используются три основных типа голографических фотоматериалов: галогенидосеребряные фотоэмульсии, бихромированная желатина, фотополимеры [4]. Наиболее широко для записи объёмных голограмм используются фотополимеры, которые могут быть оцувствлены практически в любом диапазоне видимой области спектра [4]. Разрешающая способность фотополимеров превышает 3000 мм^{-1} , а светочувствительность составляет десятки мДж/см^2 . Основными достоинствами фотополимеров являются низкий уровень шумов и простота обработки после их

экспозиции [4]. Недостатком фотополимеров является сложность их нанесения на подложку ровным по толщине слоем [4]. Оценка достоинств, недостатков и характеристик фоторегистрирующих материалов для записи объёмных голограмм с целью их использования в устройствах радиофотоники позволяет сделать вывод о целесообразности использования фотополимеров для экспонирования таких голограмм.

Для формирования свойств спектральной и пространственной избирательности объёмной голограммы в её эмульсии должна быть сформирована структура страт, образующая объёмную дифракционную решётку с расстоянием между слоями страт кратным $\lambda/2$ [8-11]. Голограмма такого типа должна записываться в линейном режиме по оптической схеме в двух встречных световых пучках [3]. Опыт разработки конструкций устройств голографической фотоники показывает предпочтительность использования в этих конструкциях объёмных голограмм, экспонированных во встречных световых пучках со сферическими волновыми фронтами [4-7]. На примере такой объёмной голограммы рассмотрим оптическую схему её экспонирования. Вариант оптической схемы для записи такой голограммы показан на рисунке 1.

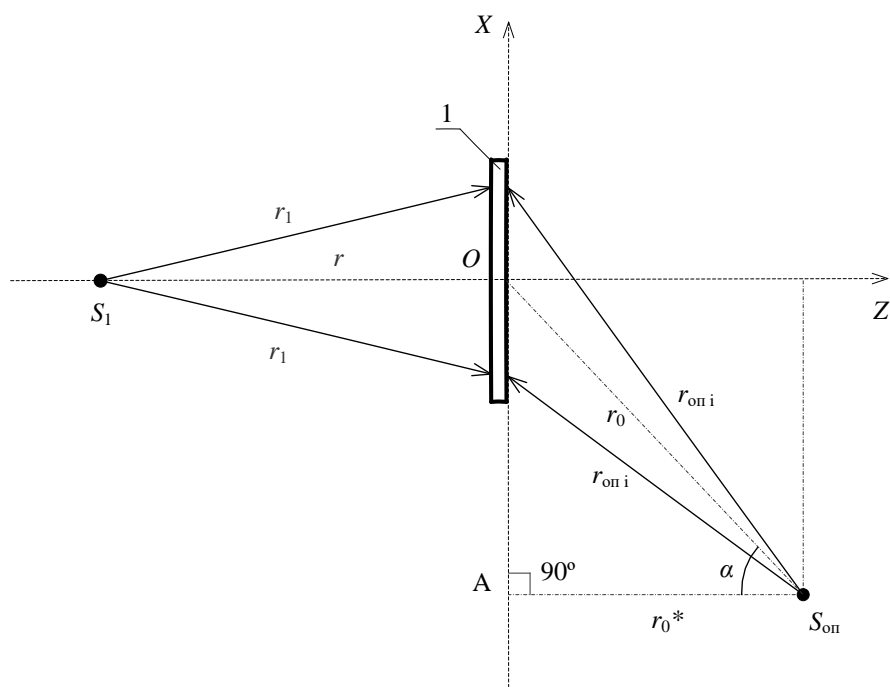


Рис. 1. Экспонирование объёмной голограммы.

На рисунке 1 использованы обозначения: 1 – голографическая фотопластинка; XOZ – прямоугольная система координат; r – расстояние от точечного источника света S_1 до плоскости голограммы; точка O – находится в точке пересечения оптических осей световых потоков, формируемых точечными источниками света S_1 и $S_{\text{оп}}$, и является началом системы координат; r_0 – расстояние от опорного точечного источника света $S_{\text{оп}}$ до точки O ; r_1 – расстояние от точечного источника света S_1 до точки O ; r_1 – расстояние от точечного источника света S_1 до произвольной точки в плоскости голограммы; $r_{\text{оп}}$ – расстояние от точечного источника света $S_{\text{оп}}$ до произвольной точки в плоскости голограммы; α – угол между оптическими осями световых потоков, формируемых точечными источниками света S_1 и $S_{\text{оп}}$; координатная ось OX лежит в плоскости голограммы; A – точка падения на координатную ось OX нормали от точечного источника света $S_{\text{оп}}$.

С учётом обозначений на рисунке 1 точечные источники света S_1 и $S_{\text{оп}}$ формируют оптические волны $E_1 = E_1^{(0)} \cos(\omega t - kr_1(x) + \varphi_1)$ и $E_{\text{оп}} = E_{\text{оп}}^{(0)} \cos(\omega t - kr_{\text{оп}}(x) + \varphi_{\text{оп}})$, где $E_1^{(0)}$ и $E_{\text{оп}}^{(0)}$ – амплитуды соответствующих волн света; $r_1 = r_1(x)$; $r_{\text{оп}} = r_{\text{оп}}(x)$; k – волновое число; φ_1 и $\varphi_{\text{оп}}$ – начальные фазы соответствующих волн света.

При записи объёмной голограммы по оптической схеме на рисунке 1 линейные размеры голографической фотопластинки много меньше расстояний r и r_0 . Угол α в этой оптической схеме выбирается в пределах $0^\circ < \alpha < 5^\circ$ с учётом возможности трёхмерной записи волновых фронтов оптического поля в эмульсии объёмной голограммы и для смещения плоскости, в которой формируется реконструированное оптическое поле, в сторону от оптической оси светового потока, падающего на голограмму [4, 9].

В эмульсии объёмной голограммы формируется объёмная дифракционная структура, коэффициент отражения которой описывается уравнением этой голограммы и, с привязкой к рисунку 1, определяется законом

$$T(x) = T_0 + T_1(x) \cos \left[k \left(r - r_0 - x \sin \alpha + \frac{x^2}{2} G_{\text{эксп}} \right) \right], \quad (1)$$

где T_0 – коэффициент отражения прямой волны;

T_1 – коэффициент отражения дифрагированной волны;

k – волновое число;

$G_{\text{эксп}} = \frac{r_0 + r(\sin^2 \alpha + 1)}{rr_0}$ – коэффициент, определяемый параметрами схемы экспонирования голограммы.

Анализ выражения (1) показывает, что структура страт в эмульсии объёмной голограммы, помимо типа голографического фоторегистрирующего материала, зависит от кривизны волновых фронтов световых потоков, которыми экспонируется эта голограмма, и характера распределения интенсивности оптического поля в эмульсии голографической фотопластинки при экспонировании голограммы [4, 9÷11], т.е. определяется значениями параметров r , r_0 , α , координатой x и коэффициентом $G_{\text{эксп}}$. При падении светового потока на объёмную голограмму амплитуда и фаза светового потока, дифрагировавшего от этой голограммы, модулируются в соответствии с выражением (1). В [8, 9] показано, что в эмульсии голограммы такого типа экспонируется многослойная дифракционная решётка, образуемая стратами эллиптической формы с незначительным эксцентриситетом эллипсов.

Для использования объёмных голограмм в устройствах радиофотоники необходимо исследовать вопрос влияния структуры их страт на параметры когерентного светового потока, падающего на голограммы такого типа.

2. Основы физических свойств спектральной и пространственной избирательности объёмной голограммы

Рассмотрим более подробно процесс изменения фазы когерентного светового потока при его отражении от слоя восстановленного серебра в эмульсии объёмной голограммы. Поведение фаз оптических волн при отражении и преломлении описывается теорией Френеля [12]. При конструировании фотонного устройства с объёмной голограммой необходимо учитывать изменение на π фазы светового потока при его отражении от страт этой голограммы [3, 12]. Преломление светового потока в эмульсии голограммы происходит при всех условиях без изменения его фазы. Проблема дифракционной эффективности объёмных фазовых голограмм рассмотрена в [3]. Амплитуда восстановленной дифрагированной волны в случае такой объёмной голограммы определяется в безразмерном виде выражением [3]:

$$U = \tanh\left(\frac{\pi n d}{\lambda \cos Q_0}\right), \quad (2)$$

где n – коэффициент преломления эмульсии голограммы; d – толщина слоя эмульсии; Q_0 – угол, образуемый реконструирующей волной света с нормалью к отражающей поверхности голограммы; λ – длина волны света.

Предполагается, что при реконструкции поля, экспонированного на объёмной голограмме, выполняются условия Брэгга [3, 12]. Рассмотрим рисунок 2(а, б), иллюстрирующий процесс реконструкции поля объёмной голограммой.

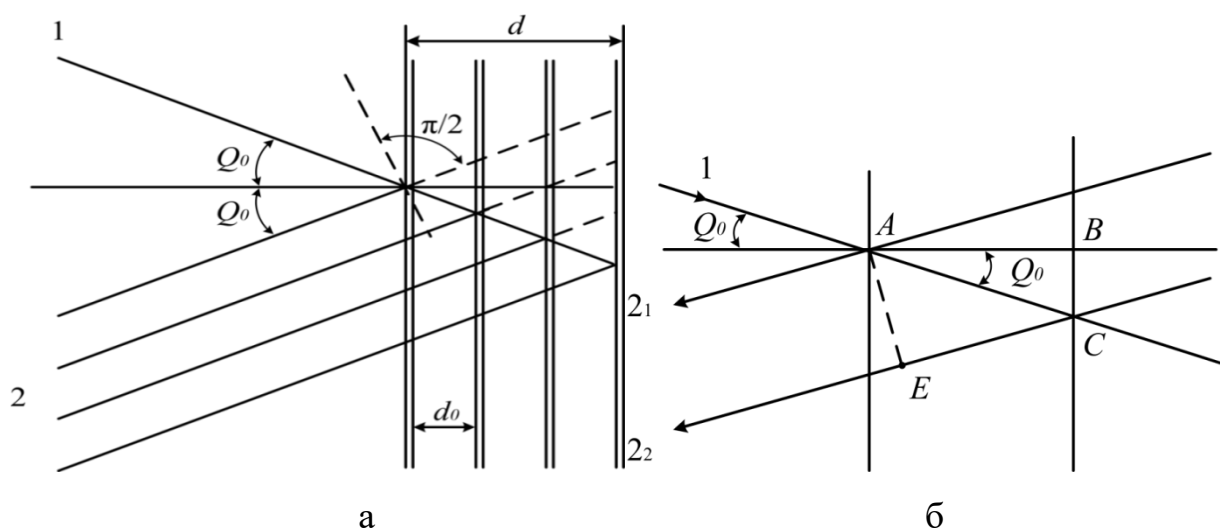


Рис. 2 (а, б). Процесс реконструкции изображения.

Обозначения, использованные на рисунке 2(а, б), соответствуют выражению (2). Цифрой 1 обозначена реконструирующая волна, а цифрой 2 – дифрагированная. Вертикальными линиями на рисунке 2(а, б) обозначены отражающие слои страт в эмульсии объёмной голограммы, в которых находится максимум плотности восстановленного серебра. Реконструирующая волна частично проходит насквозь через отражающие слои, а частично отражается. Расстояние между плоскостями отражения (стратами) на рисунке 2(а) обозначено, как d_0 . Рассмотрим рисунок 2(б), где $AB = d_0$.

Из прямоугольного треугольника ABC выразим оптический путь AC :

$$AC = \frac{d_0}{\cos Q_0}. \quad (3)$$

Рассмотрим прямоугольный треугольник ACE . В этом треугольнике:

$$\angle ACE = 2Q_0. \quad (4)$$

Выразим оптическую разность хода Δ лучей 2_1 и 2_2 :

$$\Delta = 2d_0 \cdot \cos(Q_0). \quad (5)$$

При $\Delta = m\lambda$ имеем уравнение Брэгга:

$$\cos(Q_0) = \frac{m\lambda}{2d_0}, \quad (6)$$

где m – целое число.

Пусть
$$d_0 = \frac{\rho\lambda}{2}, \quad (7)$$

где ρ – целый параметр, имеющий смысл номера плоскости страт в эмульсии голограммы, причём $\rho \geq 1$.

Тогда условие Брэгга имеет вид:

$$\cos(Q_0) = \frac{m}{\rho}. \quad (8)$$

Для выполнения условия Брэгга необходимо, чтобы правая часть выражения (8) была по абсолютной величине меньше или равна единице, т.е.

$$\frac{m}{\rho} \leq 1.$$

При выполнении условия Брэгга имеет место конструктивная интерференция оптических волн, отражённых стратами эмульсии голограммы.

Найдем условия деструктивной интерференции. Положим в уравнении (5), что:

$$\Delta = (2l + 1) \frac{\lambda}{2}. \quad (9)$$

где l – целое число.

С учётом выражения (9) условие деструкции восстановления изображения имеет вид:

$$\cos(Q_0) = \frac{2l + 1}{2\rho}. \quad (10)$$

На рисунке 3(а, б, в) представлены диаграммы углов реконструкции оптических полей объёмной отражательной голограммой. Сплошными линиями со стрелками на рисунке 3(а, б, в) изображены оптимальные направления для реконструирующей волны, а штриховые линии показывают направления полной деструкции изображения, экспонированного на голограмме. Плоскость эмульсии объёмной голограммы на рисунке 3(а, б, в) включает прямую $m = 0$ и перпендикулярна плоскости рисунка. В качестве примера на рисунке 3(а, б, в) показаны углы реконструкции и деструкции для одной, двух и трёх поверхностей почернения (страт) соответственно, размещённых в материале эмульсии экспонированной голограммы.

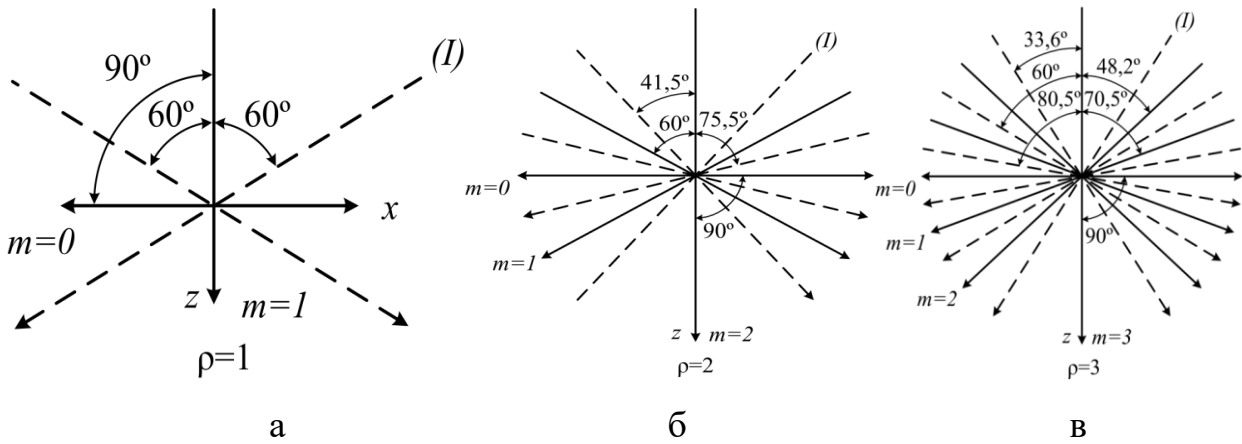


Рис. 3. Углы реконструкции и деструкции для одной, двух и трёх поверхностей почернения (страт) соответственно.

На рисунке 3(а, б, в) видно, что, при увеличении параметра ρ , уменьшается угол, соответствующий направлению первой деструкции (I). Увеличению параметра ρ соответствует увеличение толщины эмульсии голограммы. При согласовании импедансов двух прозрачных сред возможно, чтобы световые волны переходили из одной среды в другую без отражения. Толщина согласующего слоя равна $\lambda/4$ и в нём отсутствие отражённой волны реализуется за счёт деструктивной интерференции. Условие компенсации отражённой волны описывается соотношением (10). Действительно, полагая в (10) $Q_0 = 0$ и $l = 0$ находим, что

$$d_0 = \frac{\lambda}{4}. \tag{11}$$

Преобразуем соотношение (2) с учётом (8). Подставим в (2) значения параметра $\cos(Q_0)$, полученные из условия Брэгга, и запишем безразмерную амплитуду волны, восстановленной объёмной голограммой, в виде:

$$|U| = \tanh\left(\frac{\pi n d \rho}{\lambda m}\right), \tag{12}$$

где $1 \leq m \leq \rho$.

Проведём анализ соотношений (8), (10) и (12). Согласно (8) наибольшим значениям параметра m соответствуют меньшие углы восстанавливающего луча с нормалью к плоскости страт объёмной голограммы. Из (12) видно, что наибольшим значениям m , соответствуют меньшие значения амплитуды волны.

Увеличение параметра d , т.е. толщины слоя эмульсии голограммы увеличивает амплитуду восстановленной волны. Соотношение (8) позволяет найти оптимальные углы освещения при восстановлении оптического поля, экспонированного на объёмной голограмме, а соотношение (10) позволяет рассчитывать углы, при которых оптическое поле, экспонированное на голограмме, не восстанавливается. Можно утверждать, что в процессе

восстановления могут участвовать не все страты, т.к. $d_0 = \frac{\rho\lambda}{2}$, а расстояние между ближайшими плоскостями страт равно $\lambda/2$. Согласно соотношениям (8), (10) и (12) для направлений падения реконструирующей волны на объёмную отражательную голограмму, обеспечивающих оптическую разность хода лучей, отражённых системой страт, кратную $\lambda/2$, изображение, экспонированное на голограмме, не восстанавливается. Для направлений падения реконструирующей волны, обеспечивающих оптическую разность хода лучей, отраженных стратами голограммы, кратную длине волны λ , экспонированное на голограмме изображение восстанавливается полностью и имеет максимальную интенсивность. Это обуславливает наличие таких свойств объёмной голограммы, как её спектральная и пространственная избирательность. При падении на объёмную голограмму реконструирующего светового пучка со сферическим волновым фронтом для того, чтобы обеспечить наибольшее значение энергии реконструированного оптического поля, реконструирующий световой пучок должен быть узконаправленным, а его оптическая ось должна совпадать с одним из направлений оптимальной реконструкции. Для обеспечения интерференции двух когерентных световых потоков, падающих в плоскость объёмной голограммы, необходимо обеспечить либо их соосность и падение их в плоскость объёмной голограммы в направлении оптимальной реконструкции, либо, при разных углах падения световых потоков на объёмную голограмму, эти углы падения должны совпадать с направлениями оптимальной реконструкции голограммой оптического поля. Совокупность углов узконаправленного сферического реконструирующего светового потока, обеспечивающая максимальную амплитуду восстановленной волны, может быть найдена экспериментально.

Таким образом, объёмная голограмма обладает свойствами, как спектральной (к длине волны света), так и пространственной (к направлению падения реконструирующего светового потока на голограмму) избирательности. Результаты проведённого исследования могут быть использованы при построении оптической схемы голографического радиофотонного устройства.

Заключение.

1. Оценка характеристик фоторегистрирующих материалов для записи объёмных голограмм с целью их использования в устройствах радиофотоники позволяет сделать вывод о предпочтительности использования фотополимеров. Для формирования свойств спектральной и пространственной избирательности объёмной голограммы в её эмульсии должна быть сформирована структура страт, образующая объёмную дифракционную решётку с расстоянием между слоями страт кратным $\lambda/2$. Голограмма такого типа должна записываться в линейном режиме по оптической схеме в двух встречных световых пучках.

2. Структура дифракционной решётки, формирующейся в эмульсии объёмной голограммы при её экспонировании, обуславливает свойство спектральной избирательности этой голограммы к длине волны падающего на неё светового потока. Это же обуславливает её свойство пространственной избирательности, к направлению падения этого потока на голограмму. Для направлений падения реконструирующей волны на объёмную отражательную голограмму, обеспечивающих оптическую разность хода лучей, отражённых системой страт, кратную $\lambda/2$, изображение, экспонированное на голограмме, не восстанавливается. Для направлений падения реконструирующей волны, обеспечивающих оптическую разность хода лучей, отражённых стратами голограммы, кратную длине волны λ , экспонированное на голограмме изображение восстанавливается полностью и имеет максимальную интенсивность. При использовании объёмной голограммы в конструкции голографического радиофотонного устройства реконструирующий световой пучок со сферическим волновым фронтом должен быть как можно более узким, а направление его падения на объёмную голограмму должно находиться между

двумя соседними направлениями деструкции. Для обеспечения интерференции двух когерентных световых потоков, падающих в плоскость объёмной голограммы, необходимо обеспечить либо их соосность и падение их в плоскость объёмной голограммы в направлении оптимальной реконструкции, либо, при разных углах падения световых потоков на объёмную голограмму, эти углы падения должны совпадать с направлениями оптимальной реконструкции голограммой оптического поля. Совокупность углов узконаправленного сферического реконструирующего светового потока, обеспечивающая максимальную амплитуду восстановленной волны, может быть найдена экспериментально.

Таким образом, объёмная голограмма обладает свойствами, как спектральной (к длине волны света), так и пространственной (к направлению падения реконструирующего светового потока на голограмму) избирательности. Результаты проведённого исследования могут быть использованы при построении оптической схемы голографического радиофотонного устройства.

Финансирование.

Оставить пустым если финансирование отсутствует

Литература

1. Межведомственная программа исследований и разработок в области фотоники на 2017-2020 годы. Разработана на основании Протокола заседания президиума Совета при Президенте РФ по модернизации экономики и инновационному развитию России от 9 июля 2014 г. № 4
2. Белкин М.Е., Кудж С.А., Сигов А.С. Новые принципы построения радиоэлектронной аппаратуры СВЧ-диапазона с использованием радиофотонной технологии. *Российский технологический журнал*. №1(10). 2016. С.4-20.
3. Милер М. *Голография*. Ленинград, Машиностроение Ленинградское отделение. 1979. 207 с.

4. Денежкин Е.Н. *Оптическая голография*. Новосибирск, Издательство НГТУ. 2002. 93 с.
5. Цветков А.Ю., Прыгунов А.Г., Аникейчик Н.Д., Рыбалко И.П., Осипов Н.А. Аналого-цифровое преобразование сигналов с угловой манипуляцией для программно-определяемых радиосистем. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2016. Т.16. №3. С.402–408. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-3-402-408
6. Габриэльян Д.Д., Демченко В.И., Караваев С.В., Михайлов Н.А., Прыгунов А.Г. Тракт формирования управляющего сигнала голографической системы автоматической регулировки усиления и его моделирование. *Радиотехника*. 2019. Т.83. №7(9). С.215-221.
7. Звездина М.Ю., Елисеев А.В., Прыгунов А.Г., Русанов Р.И. Использование голографии в задаче стабилизации частоты генераторного оборудования. *Электросвязь*. 2019. №1. С.29-34.
8. Prygunov, A.G., Sinjutin S.A., Prygunov A.A., Sinjutin E.S. The analysis of strata form in golographic emulsion and a view of an image reconstructed with a Fourier-gologram. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2014. V.9. №12. P.2603-2607.
9. Безуглов Д.А., Прыгунов А.Г., Трепачев В. В. Анализ дифракции света на эталонной голограмме при измерении перемещений объектов пространственно-спектральным методом. *Автометрия*. СО РАН. 1998. №5. С.21-28.
10. Звездина М.Ю., Прыгунов А.Г., Трепачёв В.В., Прыгунов А.А., Самоделов А.Н. Исследование условий экспонирования эталонной голограммы голографического интерферометра. *Физические основы приборостроения*. 2012. Т.1. №2. С.65-71.
11. Звездина М.Ю., Прыгунов А.Г., Прыгунов А.А., Шокова Ю.А. Анализ распределения интенсивности оптического поля в эмульсии отражательной фурье-голограммы. *Международный независимый институт Математики и систем «МиС»*. 2015. №1(12).

12. Родионов, С. А. Основы оптики. С. А. Родионов. Санкт-Петербург, ГИТМО.
2000. 364 с.

Для цитирования:

Прыгунов А.Г. Анализ свойств избирательности объёмных голограмм в радиофотонных устройствах. *Журнал радиотехники* [электронный журнал]. 2021. №11. <http://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.11.5>