

С.Б. Одинокоев, В.В. Маркин, Д.С. Лушников,
А.С. Кузнецов, А.Б. Соломашенко,
Е.А. Дроздова

ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ПОЛУЧЕНИЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ИНДИКАТОРА ДЛЯ ОТОБРАЖЕНИЯ ЗНАКОВО-СИМВОЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Рассмотрена схема голографического индикатора для отображения знаково-символьной информации, представляющего собой волноводную стеклянную пластинку с нанесенными на ее поверхность голограммными оптическими элементами. Для реализации такой схемы выбран фоточувствительный материал и разработан стенд для получения подобного индикатора. Предложенная схема позволяет получать индикаторы больших размеров за счет позонной записи и стыковки отдельных фрагментов, задавать нужное распределение экспозиции по зонам, в том числе и нелинейное, а также оперативно корректировать его в соответствии с полученными экспериментальными результатами.

E-mail: odinokov@bmstu.ru, kus_a_s@mail.ru, art_s87@mail.ru

Ключевые слова: голограммный оптический элемент, дифракционная решетка, голографический дисплей, система отображения информации, волновод.

В течение последних трех десятилетий достигнут существенный прогресс в области технологий отображения информации и визуализации, особенно в системах отображения информации для автомобилей, самолетов и систем, где наблюдаемое изображение перекрывается реальной сценой.

Достаточно перспективным направлением является построение малогабаритных оптических систем с голограммными оптическими элементами (ГОЭ) для отображения информации. Использование ГОЭ и световодных пластин позволяет существенно снизить массогабаритные параметры всей системы отображения информации, так как при этом не просто перепроецируется выходной зрачок оптической системы в плоскость расположения глаз оператора, а «растягивается» до необходимых размеров за счет наличия ГОЭ. Это позволяет значительно уменьшить габариты оптической системы (до миниатюрных).

Принцип работы голографического индикатора. Голографический дисплей представляет собой стеклянную пластину, в которой излучение распространяется под действием полного внутреннего отражения (ПВО), с нанесенными на поверхность ГОЭ и призмой для

ввода излучения. Данный дисплей входит в состав широкоугольного коллиматорного индикатора (рис. 1). Последний включает в себя ЖК-дисплей, формирующий необходимое для ввода в поле зрения оператора изображение, систему подсвета с лазерным или светодиодным источником излучения и проекционную систему. Эта система формирует выходной зрачок небольшого размера, а также необходимый угол поля зрения. С помощью призмы излучение вводится в пластинку под углом ПВО и распространяется в ней. Попадая на поверхность пластинки с ГОЭ, часть излучения выводится из нее.

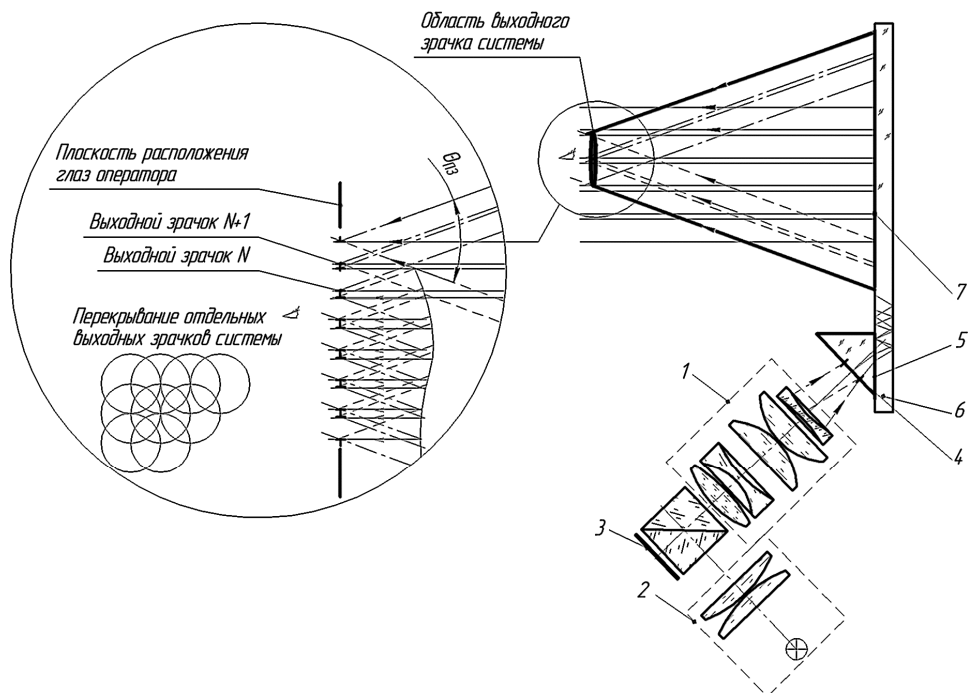


Рис. 1. Оптическая схема голографического дисплея в составе широкоугольного коллиматорного индикатора:

1 — проекционная система с выходным зрачком 4; 2 — осветительный канал; 3 — отражающий FLCOS дисплей (или пропускающий); 5 — призма для ввода излучения в подложку; 6 — стеклянная пластинка; 7 — ГОЭ для вывода излучения из пластинки

В каждой зоне выходного ГОЭ из пластинки будет выводиться весь конус пучков излучения, формируемый проекционной системой, а пересечение крайних лучей определит размер зоны выходного зрачка, которая, по сути, будет состоять из большого числа перекрывающихся выходных зрачков проекционной системы, переносимых индикатором в плоскость расположения глаз оператора. В результате небольших размеров (5...10 мм) выходной зрачок проекционной системы «растягивается» с помощью индикатора до зоны значительно

больших размеров за счет многократных перекрытий отдельных зрачков в зоне расположения глаз оператора.

Для реализации индикатора использована схема [1] с ГОЭ на одной стеклянной пластинке, а в качестве вводного элемента использована призма, наклеенная на поверхность пластинки через слой иммерсии. Данный способ реализации индикатора позволяет вводить излучение в волновод с минимальными потерями в отличие от дифракционных решеток.

В общем случае ГОЭ на поверхности пластинки представляют собой две дифракционные решетки: первая — для вывода излучения, а вторая — промежуточная — разворачивает излучение на 90° для «растягивания» изображения вдоль одной из осей (рис. 2, а). Обе эти решетки должны обладать переменной дифракционной эффективностью для выравнивания в зоне наблюдения яркости отдельных выходных зрачков между собой.

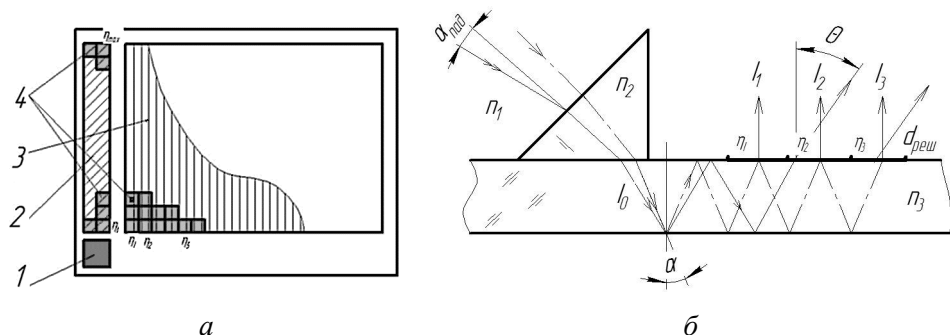


Рис. 2. Устройство (а) и принцип работы (б) голографического индикатора:

1 — призма для ввода излучения; 2 — промежуточная решетка; 3 — выводная решетка; 4 — фрагменты, на которые разбиваются решетки при записи

В качестве фоточувствительного материала для получения голографического индикатора могут быть использованы галогенидосеребряные эмульсии, бихромированная желатина, фоторезистивные слои, фотополимеры и т. д. Основные требования, предъявляемые к фоточувствительному материалу: высокая разрешающая способность (более 1000 линий/мм), возможность обеспечения высокой дифракционной эффективности, безусадочность, низкая угловая селективность (так как зачастую необходимо выдержать большой угол поля зрения широкоугольного коллиматорного индикатора, а голографические эмульсии, обладающие высокой селективностью, могут не обеспечить необходимый диапазон); более того, из-за сильной зависимости дифракционной эффективности от угла падения пучка на эмульсию даже при небольших углах поля системы яр-

кость изображения в пределах выходного зрачка будет существенно изменяться.

В качестве регистрирующего материала применялся фоторезист Shipley S1813. Основным преимуществом фоторезистов в отличие от других сред для голографии, например содержащих желатину, является их безусадочность, что чрезвычайно важно при получении и восстановлении ГОЭ; использование фоторезиста в качестве регистрирующего материала для получения ГОЭ удобно с точки зрения технологии тиражирования.

Расчет параметров голографического индикатора. Определим период дифракционной решетки, предназначенной для вывода излучения из пластинки:

$$d_{\text{реш}} = \frac{\lambda}{n_{\text{ст}} \sin \alpha + n_1 \sin \theta}, \quad (1)$$

где $n_{\text{ст}} = 1,54$ — показатель преломления стекла БК8 (толщина пластинки 3 мм); $n_1 = 1$ — показатель преломления воздуха; θ — угол дифракции на решетке; α — угол распространения излучения в пластинке; $\lambda = 532$ нм — длина волны.

Расчет проведем для луча, идущего параллельно (рис. 2, б) оптической оси ($\theta = 0^\circ$), а угол распространения луча в пластинке можно вычислить, зная показатели преломления материалов ($n_{\text{пр}} = 1,51$) и угол падения излучения на призму. В данном случае $\alpha = 45,5^\circ$, а $d_{\text{реш}} = 484$ нм.

Далее определим размер зон, на которые впоследствии будут разбиты выводная и промежуточная решетки (см. рис. 2). Расстояние между двумя точками падения луча, попадающего на поверхность пластинки с дифракционной решеткой при переотражении,

$$L = 2d_{\text{пл}} \operatorname{tg} \alpha = 6 \text{ мм}, \quad (2)$$

где $d_{\text{пл}} = 3$ мм — толщина пластинки. Соответственно размер зоны разбиения можно принять равным 5×5 мм².

Теперь определим дифракционную эффективность каждой отдельной зоны с решеткой, чтобы яркость изображения, формируемого индикатором, была равномерной. Потерями на ПВО и потерями из-за дифракции второго и более высоких порядков вследствие их малой величины пренебрегаем на этапе предварительного расчета.

Допустим, что в пластинку попало излучение I_0 , тогда на первой дифракционной решетке с эффективностью η_1 в первой зоне выйдет доля излучения

$$I_1 = I_0 \eta_1. \quad (3)$$

Далее для второй зоны с учетом вывода излучения на первой решетке и с учетом условия, что $I_1 = I_2 = \dots = I_N$, получим

$$I_2 = (I_0 - I_1)\eta_2 = I_0(1 - \eta_1)\eta_2, \quad (4)$$

$$\eta_2 = \frac{\eta_1}{(1 - \eta_1)}. \quad (5)$$

То же самое для третьей решетки:

$$\begin{aligned} I_3 &= (I_0 - I_1 - I_2)\eta_3 = (I_0 - I_0\eta_1 - I_0(1 - \eta_1)\eta_2)\eta_3 = \\ &= I_0[1 - \eta_1 - (1 - \eta_1)\eta_2]\eta_3 = I_0[(1 - \eta_1)(1 - \eta_2)]\eta_3; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} [(1 - \eta_1)(1 - \eta_2)]\eta_3 = \eta_1 &\Rightarrow \left[(1 - \eta_1) \left(1 - \frac{\eta_1}{(1 - \eta_1)} \right) \right] \eta_3 = \eta_1 \Rightarrow \\ &\Rightarrow \left[(1 - \eta_1) \left(\frac{1 - \eta_1 - \eta_1}{(1 - \eta_1)} \right) \right] \eta_3 = \eta_1 \Rightarrow \eta_3 = \frac{\eta_1}{1 - 2\eta_1}. \end{aligned} \quad (7)$$

Таким образом, формула для определения дифракционной эффективности решетки в каждой зоне с учетом соотношений (5) и (7) будет иметь следующий вид:

$$\eta_i = \frac{\eta_1}{1 - (i - 1)\eta_1}. \quad (8)$$

Схема получения голограммных элементов. Как отмечено выше, для вывода излучения из волновода можно использовать обычную дифракционную решетку, причем она должна обладать переменной эффективностью, возрастающей от минимального до максимального значения с увеличением числа переотражений и соответственно потерь излучения, чтобы обеспечить равномерную яркость наблюдаемого изображения по всему полю.

Для получения такой дифракционной решетки предложена оптическая схема, приведенная на рис. 3. Отличительной особенностью данной оптической схемы получения выходной и промежуточной дифракционных решеток является их позонная запись, т. е. решетка разбивается на отдельные фрагменты, которые состыковываются в процессе получения решетки с помощью прецизионной системы перемещения пластинки с фоточувствительным слоем.

Позонная запись позволяет достаточно просто получать ГОЭ и дифракционные решетки, соответственно и голографические индикаторы больших размеров. При этом нет необходимости существенно расширять пучок, обеспечивая равномерное поле засветки пластинки, что является существенным преимуществом такой схемы.

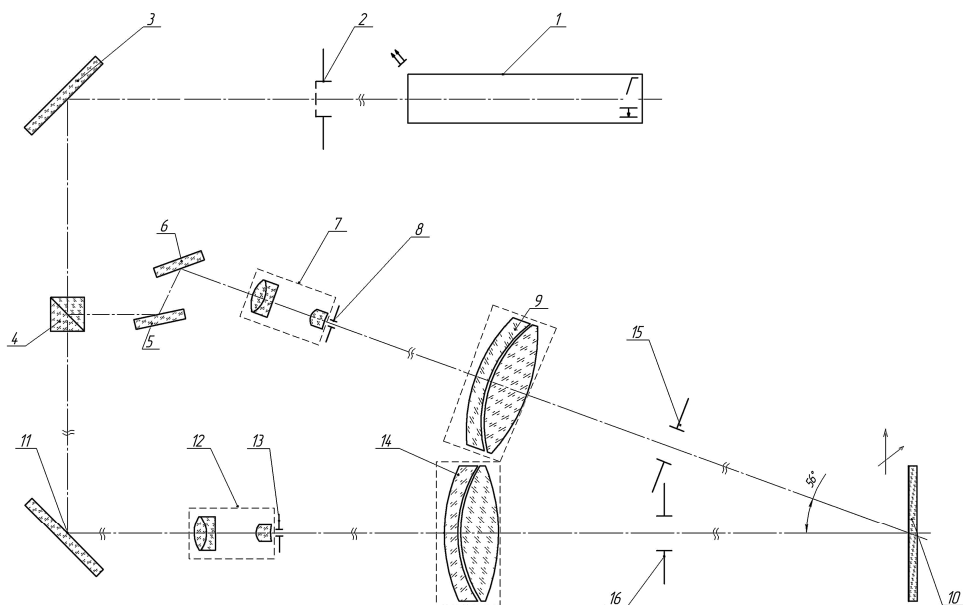


Рис. 3. Оптическая схема получения голографического индикатора:

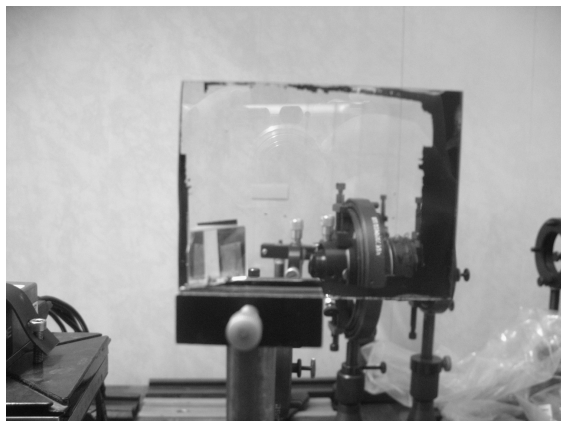
1 — He-Cd-лазер ($\lambda = 0,4416$ мкм); 2 — затвор; 3, 5, 6, 11 — зеркала; 4 — светоделительный кубик; 7, 12 — микрообъективы с диафрагмами 8 и 13; 9, 14 — коллимационные объективы; 10 — пластинка с фоточувствительным слоем, установленная на прецизионной системе перемещения; 15, 16 — диафрагмы, ограничивающие размер фрагментов, на которые разбивается решетка

В данной схеме получения дифракционной решетки с переменной эффективностью не используются транспаранты с нелинейным пропусканием или движущиеся маски, а различная дифракционная эффективность обеспечивается изменением экспозиции в каждой зоне, на которые разбита решетка по всей длине. Таким образом, благодаря специально разработанному для этих целей программному обеспечению по управлению затвором лазера и двухкоординатной системой перемещения можно вести запись с требуемым рассчитанным распределением экспозиций по зонам. В том числе можно задавать нелинейное изменение экспозиции по зонам, а также оперативно корректировать экспозицию отдельных частей решетки, задавая необходимое значение вручную. Кроме того, время получения отдельного фрагмента решетки не превышает нескольких десятков секунд, что позволяет избежать влияния вибраций и прочих внешних факторов.

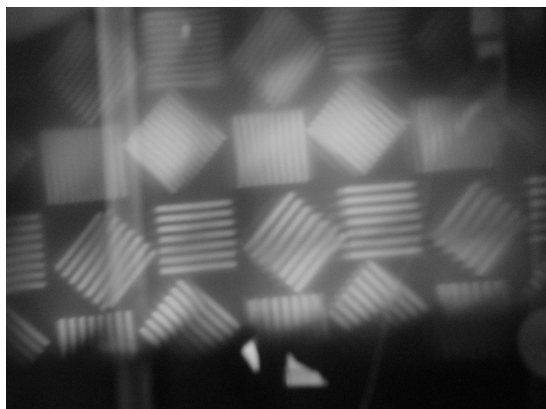
Размеры зон, на которые будет разбита решетка, а соответственно и размеры диафрагмы, установленной в обеих ветвях схемы, будут определяться из условия, что луч, идущий в пластинке, подчиняясь закону полного внутреннего отражения, при каждом падении на ту сторону пластинки, где есть дифракционная решетка, будет падать на следующую зону. При данном подходе с правильно подобранным

размером зоны и экспозицией яркость изображения, наблюдаемого через голографический индикатор, будет равномерной по всему полю. Следует отметить, что на самом деле в пластинку входит конус лучей с большим углом поля, соответственно и внутри пластинки углы их распространения будут отличаться, поэтому определение размера зоны целесообразно вести по лучу, идущему параллельно оптической оси. В этом случае для крайних лучей приведенное выше условие может не выполняться, лучи могут дважды попадать на одну и ту же решетку или, наоборот, пропускать зоны, что приведет к некоторому изменению яркости изображения по полю. Для голографических индикаторов, обеспечивающих небольшие углы поля зрения (до 10°), это изменение невелико и им можно пренебречь.

Результаты исследования. С помощью разработанной оптической схемы получен голографический индикатор с выходной ди-



а



б

Рис. 4. Экспериментальный образец голографического индикатора (а) и изображение тестовой миры, наблюдаемое с помощью голографического индикатора (б)

фракционной решеткой размером 100×75 мм, а размер зоны разбиения при этом составил 5×5 мм (рис. 4). Голографический индикатор выполнен на стекле БК8 толщиной 3 мм, угол поля зрения составил $\pm 10^\circ$, периоды выводной и промежуточной дифракционных решеток составили соответственно 484 и 342 нм [1—5], а углы схемы получения при этом равнялись 56° и 84° .

Для полученного экспериментального образца измерены дифракционные эффективности отдельных зон разбиения. На рис. 5 видно, что расчетные и измеренные значения дифракционной эффективности в каждой зоне достаточно близки вследствие корректировки экспозиции в процессе получения решеток. Таким образом, достигается достаточно равномерное по всему полю распределение яркости получаемого с помощью индикатора изображения.

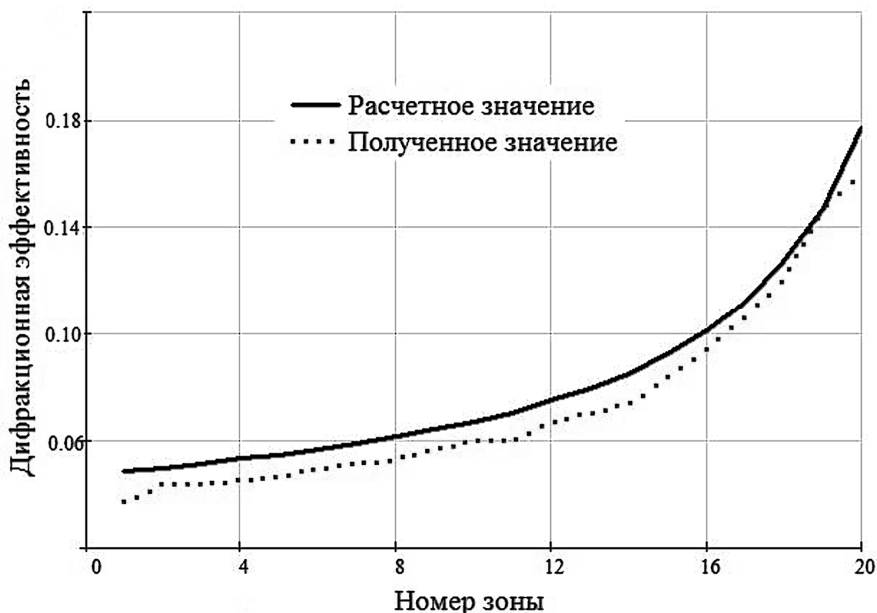


Рис. 5. Зависимости расчетной и полученной дифракционных эффективностей от номера зоны в каждой зоне разбиения выходной решетки голографического индикатора

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках соглашения о предоставлении гранта № 14.В37.21.0739 по НИР «Разработка и исследование малогабаритных оптических систем с голограммными оптическими элементами для отображения информации на дисплеях и индикаторах» Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Planar configuration for image projection / L. Eisen, M. Meyklyar, M. Golub et al. // Applied optics. – 2006. – Vol. 45. – No. 17.
2. Design and experiments of planar optical light guides for virtual image displays / L. Eisen, M. Meyklyar, M. Golub et al. // Proceedings of SPIE. – Vol. 5182.
3. Putilin A., Morozov V. Waveguide holograms with white light illumination // Optical engineering. – 1991. – Vol. 30. – No. 10. – P. 1615.
4. Optical device and virtual image display device. Sony Corporation, US 2008/0239424. – 2008.
5. Improvements in or relating to waveguides. BAE System PLC, WO 2010/067114. – 2010.

Статья поступила в редакцию 26.09.2012