

Оптимизация и экспериментальное исследование коэффициента пропускания голограммного дисплея волноводного типа

И. А. Гуськов^{1,2}, Э. Р. Муслимов^{1,3,4}, Н. К. Павлычева¹

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева — КАИ, Казань, Россия

² АО «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

³ ASTRON — Нидерландский Институт Радиоастрономии, Двингело, Нидерланды

⁴ Астрофизическая Лаборатория Марселя, Марсель, Франция

В работе рассматривается разработка оптической схемы голограммного дисплея волноводного типа для создания лабораторного макета. Разработка основана на разработанной ранее методике совместной оптимизации показателей разрешения и дифракционной эффективности, а создаваемая оптическая схема необходима для экспериментального подтверждения данной методики. Схема обеспечивает формирование изображений в спектральном диапазоне 495–595 нм, имеет угловое поле 8,7° и диаметр выходного зрачка 8 мм. С помощью моделирования показано, что коэффициент дифракционная эффективность дисплея по всему полю изменяется от 30,1 до 45,8% для средней длины волны. Скомпонована и откалибрована установка для экспериментального исследования характеристик дисплея.

Ключевые слова: дополненная реальность, объемно-фазовая голограмма, дифракционная эффективность, качество изображения, лабораторный прототип.

Цитирование: Гуськов, И. А. Оптимизация и экспериментальное исследование коэффициента пропускания голограммного дисплея волноводного типа / И. А. Гуськов, Э. Р. Муслимов, Н. К. Павлычева // НОЛОEXPO 2021 : XVIII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. — С. 58–64.

Введение

Область разработки и реализации систем дополненной реальности в последние годы развивается быстрыми темпами. Среди известных типов дисплеев дополненной реальности можно выделить голограммные дисплеи волноводного типа [1–3]. Ввод и вывод излучения в волновод осуществляются с помощью голограммных оптических элементов (ГОЭ). К главным преимуществам таких систем можно отнести простоту конструкции и возможность согласования со зрачком глаза наблюдателя в произвольном положении за счет разделения пучков. Однако существует проблема яркостных характеристик таких систем, которая в первую очередь зависит от распределения эффективности ДОЭ по полю зрения во всем рабочем спектральном диапазоне. Ранее авторами была предложена методика расчета и оптимизации оптических схем подобных дисплеев [4], позволяющая достичь требуемого компромисса между качеством изображения и дифракционной эффективностью (ДЭ) голограммных элементов. В настоящей работе рассматриваются подготовка лабораторного прототипа для экспериментального подтверждения данной методики.

Табл. 1. Технологические ограничения

Параметр	Предельное значение
Глубина модуляции	0,06
Толщина структуры, мкм	3–50
Изменение толщины	15%
Частота штрихов, мм ⁻¹	< 1000
Углы падения при записи, °	< 85

1. Постановка задачи

Разрабатываемая оптическая схема должна позволять измерить основные характеристики дисплея и продемонстрировать сохранение показателей качества изображения и повышение равномерности дифракционной эффективности по полю зрения и по сравнительно широкому спектральному диапазону. При этом она должна быть реализуема при использовании имеющихся технологий и оборудования, а также с учетом ограниченных ресурсов на создание прототипа.

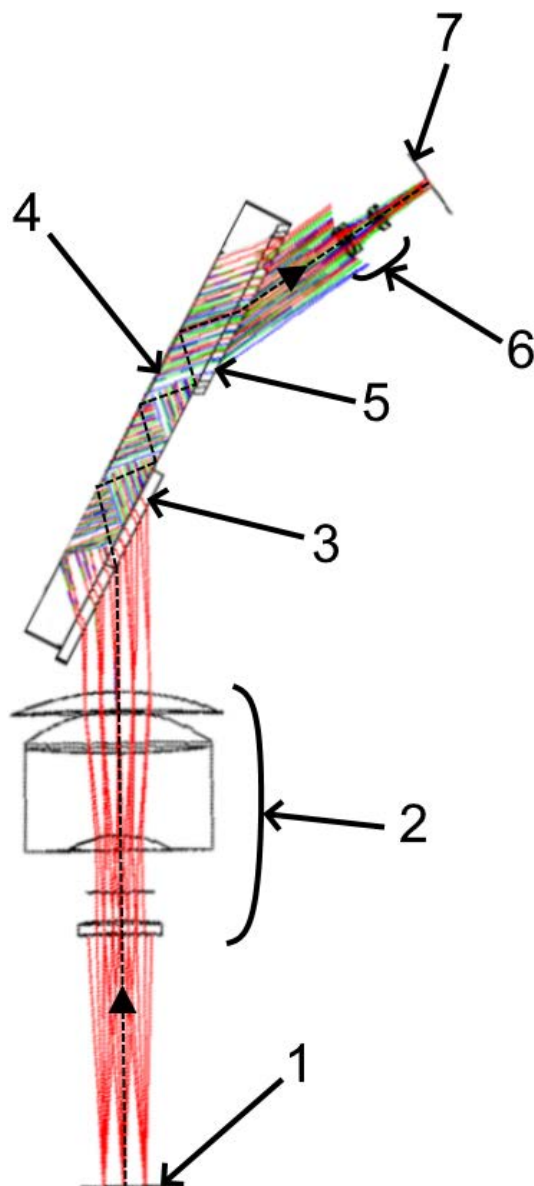
Предполагается, что вводная и выводная решетка волноводного дисплея являются пропускающими объемно-фазовыми и записываются с помощью Ar лазера на длине волны 488 нм в слое бихромированной желатины (БХЖ). Технологические ограничения, имеющиеся в данном случае, указаны в табл. 1.

2. Оптическая схема

Для расчета оптической схемы лабораторного прототипа были выбраны следующие исходные данные:

- Рабочий спектральный диапазон 495–595 нм,
- Угловое поле зрения $7,63^\circ \times 4,24^\circ$ (диагональ $8,7^\circ$),
- Диаметр выходного зрачка 8 мм.

Принципиальная оптическая схема аналогична описанной в [4] и показана на рис. 1. В качестве источника излучения 1 может служить микродисплей, либо тест-объект — щелевая или точечная диафрагма. В качестве коллимирующего объектива 2, подающего излучение на вход волновода, предложено использовать фотообъектив Юпитер-11 ($f' = 135$ мм, 1:4). Данный объектив отличается сравнительно высоким качеством изображения и широко доступен. При этом известна его точная оптическая схема, что упрощает моделирование. Дисплей включает вводную решетку 3, волновод 4 и выводную решетку 5. Решетки 3 и 5 имеют идентичную частоту штрихов для компенсации дисперсии. Обе решетки заклеиваются покровными стеклами. Волновод 4 представляет собой пластину толщиной 10 мм из оптического стекла К8. Увеличение толщины волновода позволяет уменьшить габариты установки при сохранении длины оптического пути и упростить получение полного внутреннего отражения за счет уменьшения числа отражений. Для исследования изображения используется объектив



1 – излучающая матрица, 2 – коллимирующий объектив, 3 – вводная решетка, 4 – волновод, 5 – выводная решетка, 6 – микрообъектив, 7 – плоскость регистрации изображения

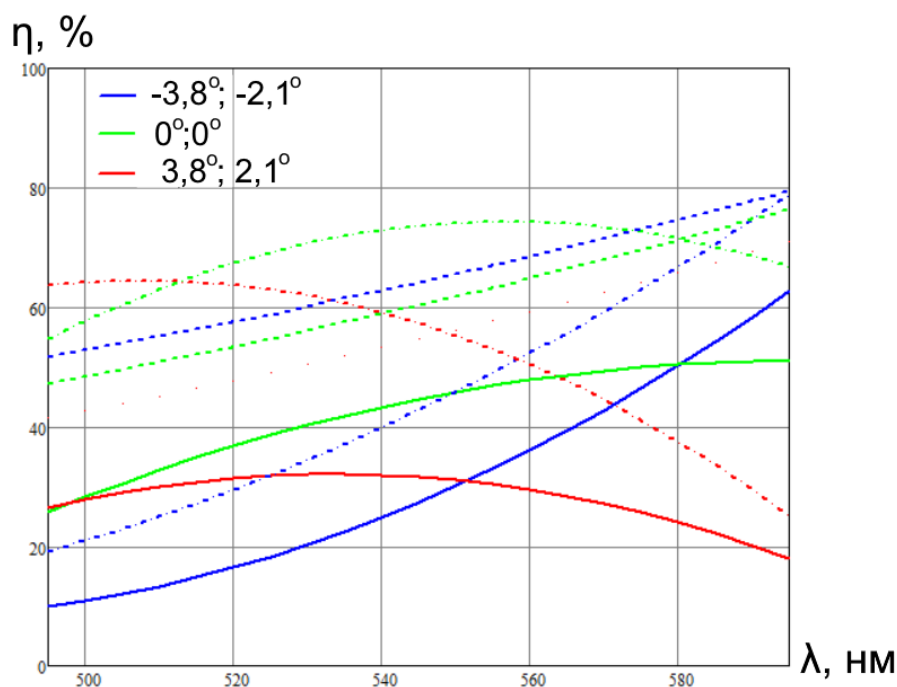
Рис. 1. Принципиальная оптическая схема прототипа голограммного дисплея

микроскопа 6, моделирующий глаз наблюдателя. Для данной цели был выбран объектив ОМ-3 (3,7*/0,11), имеющий фокусное расстояние 29,9 мм и диаметр первой линзы 8 мм.

При оптимизации в качестве переменных параметров использовались угол разворота первой решетки относительно падающего пучка, координаты источников записи для двух решеток, толщина голографической структуры и глубина модуляции для каждой из решеток. Были введены граничные условия, требующие соблюдения технологических ограничений, указанных в табл. 1, равенства пространственных частот двух решеток, выполнения условий ПВО для всех длин волн и точек поля зрения, а также совпадения точек пересечения главных лучей с поверхностью изображения на разных длинах волн. При этом целевая функция включала значения дифракционной эффективности для центра (550 нм) и краев (495 и 595 нм)

Табл. 2. Параметры голографической структуры решеток

Параметр	Вводная решетка	Выводная решетка
Частота штрихов, мм^{-1}	435	435
Толщина структуры, мкм	20,7	3,7
Глубина модуляции	0,051	0,056
Угол падения для источника 1	$50,78^\circ$	$82,82^\circ$
Угол падения для источника 2	$34,20^\circ$	$51,24^\circ$



Штрихпунктирные линии — вводная решетка, пунктирные линии — выводная решетка, сплошные линии — вся система

Рис. 2. Расчетная дифракционная эффективность дисплея

спектрального диапазона, центра и углов поля зрения, а также взвешенное среднее квадратическое значение радиуса пятна рассеяния. При оптимизации значения ДЭ в 9 контрольных точках ограничивались значениями 15% и 60%. При этом рассчитывалась итоговая ДЭ, то есть произведение значений для вводной и выводной решеток.

Моделирование и оптимизация проводились в среде Zemax Optics Studio с помощью пользовательских библиотек dll и подпрограмм-макросов, позволяющих учитывать параметры голографической структуры и вычислять ДЭ объемно-фазовой голограммы.

Параметры голографической структуры решеток, полученные в результате оптимизации, представлены в табл. 2.

Изменение ДЭ решеток и дисплея в целом по полю зрения и спектральному диапазону было рассчитано с использованием соотношений теории Когельника [5]. Результаты расчета показаны на рис. 2. Из графиков видно, что в рассчитанной схеме достигается высокая пространственная равномерность ДЭ — изменение от 30,1% до 45,8% по всему полю зрения для средней длины волны. Изменение эффективности по спектру также удается ограничить.

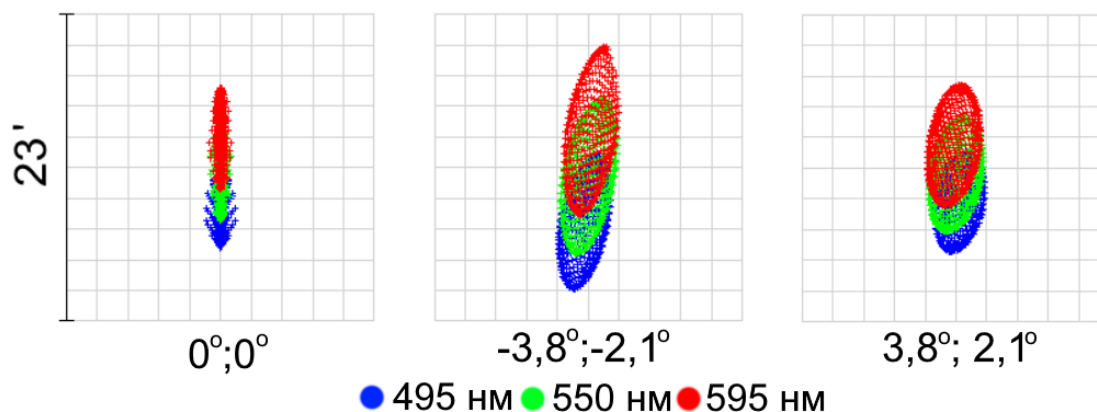


Рис. 3. Точечные диаграммы прототипа голограммного дисплея

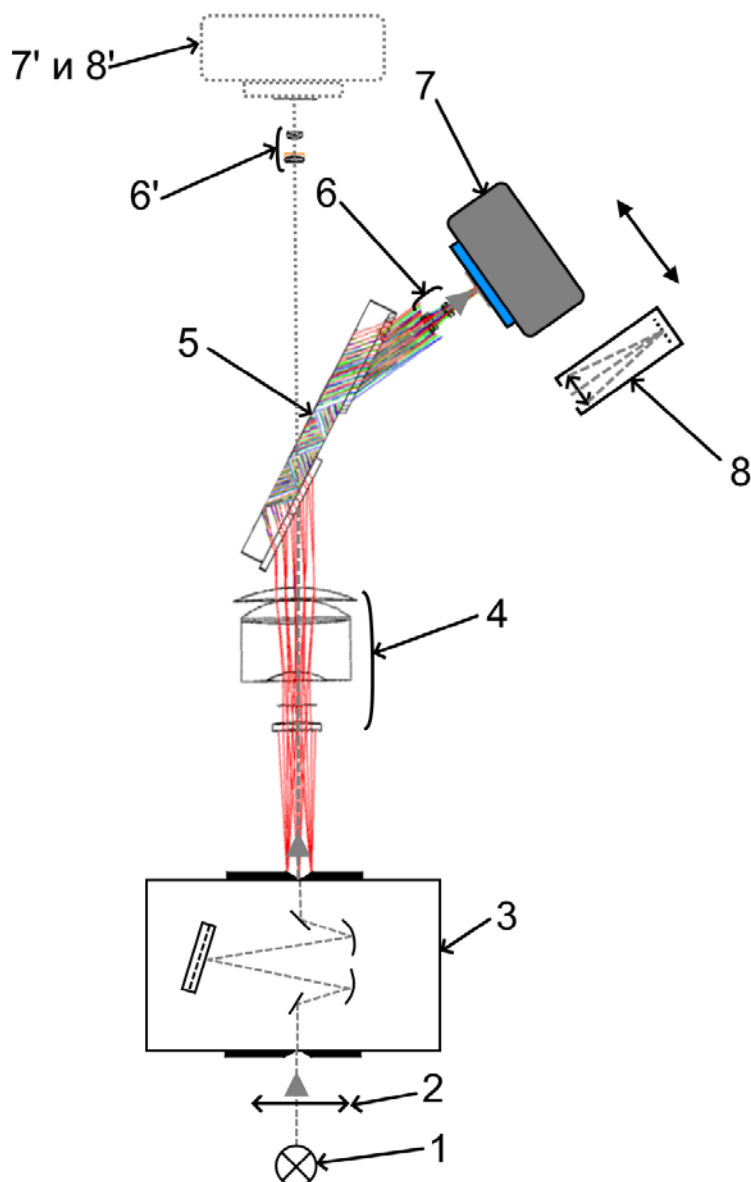
Для проверки качества изображения дисплея использовались точечные диаграммы. На рис. 3 показаны диаграммы для контрольных точек поля зрения. Среднеквадратическое угловое значение радиального размера диаграмм составляет $2,9'$, $4,4'$ и $3,2'$ соответственно. В данном случае качество изображения достаточно высоко для задач эксперимента и определяется вспомогательной оптикой, а не волноводным голографическим дисплеем.

3. Программа экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования прототипа дисплея должны включать определение показателей качества изображения и измерение дифракционной эффективности. При этом необходимо обеспечить измерение данных величин на разных длинах волн. Для проведения экспериментальных исследований была подготовлена лабораторная установка, схема которой показана на рис. 4.

В качестве источника сплошного спектра используется галогеновая лампа 1. Ее излучение через конденсор 2 подается на входную щель монохроматора 3 (МДР-41). Монохроматор позволяет выделить узкую область вблизи произвольной расчетной длины волны. Кроме того, выходная щель монохроматора может использоваться в качестве тест-объекта. После выходной щели устанавливаются коллиматор 4, дисплей 5 и микрообъектив 6. В фокальной плоскости микрообъектива при измерении эффективности устанавливается фотодиод 7. При оценке качества изображения она совмещается с предметной плоскостью цифрового микроскопа 8. При достаточно малой ширине щели можно считать получаемое распределение освещенности в ее изображении функцией рассеяния линии, а при использовании механизма поворота щели можно провести измерения в меридиональной и сагиттальной плоскостях. В обоих случаях измерения относительные — результаты сравниваются с данными, полученными в отсутствие дисплея (см. позиции 7' и 8' фотоприемников).

В настоящее время установка на базе монохроматора МДР-41 собрана и отъюстирована на каф. Оптико-электронных систем КНИТУ-КАИ. Проведена ее предварительная калибровка с одиночной объемно-фазовой решеткой в качестве объекта исследования. Калибровочные изображения выходной щели, полученные на разных длинах волн, показаны на рис. 5.



1 – источник излучения (галогеновая лампа), 2 – конденсор, 3 – монохроматор (МДР-41), 4 – коллимирующий объектив, 5 – голограммный дисплей, 6 – микрообъектив, 7 и 7' – фотоприемник (Si фотодиод), 8 и 8' – цифровой микроскоп

Рис. 4. Принципиальная схема измерительной установки

Заключение

Разработана оптическая схема для лабораторного прототипа голограммного дисплея волнового типа. Дисплей обладает сравнительно высокой равномерностью дифракционной эффективности в диапазоне 495–595 нм и по полю зрения с диагональю $8,7^\circ$. При этом схема удовлетворяет всем имеющимся технологическим ограничениям. Сформирована программа экспериментальных исследований, собрана и откалибрована лабораторная измерительная установка. Следующим этапом исследования должно стать получение функций рассеяния линии и спектральной зависимости дифракционной эффективности прототипа дисплея на данной установке.

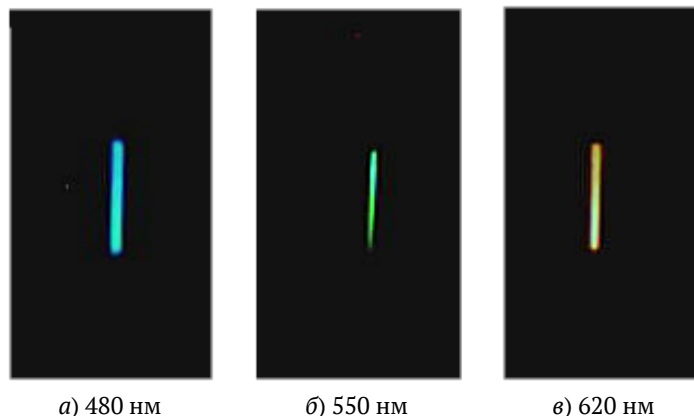


Рис. 5. Калибровочные изображения выходной щели монохроматора

Список источников

- [1] **Rolland, J. P.** [See-through head-worn display \(HWD\) architectures](#) / J. P. Rolland, K. P. Thompson, H. Urey, M. Thomas // Handbook of Visual Display Technology / Ed. by J. Chen, W. Cranton, M. Fihn. — Springer, Cham, 2016. — P. 2929–2961.
- [2] **Liu, Z.** [Design of a uniform-illumination binocular waveguide display with diffraction gratings and freeform optics](#) / Z. Liu, Ya. Pang, C. Pan, Zh. Huang // Optics Express. — 2017. — Vol. 25. — № 24. — P. 30720–30731.
- [3] **Yu, C.** [Highly efficient waveguide display with space-variant volume holographic gratings](#) / C. Yu, Yi. Peng, Q. Zhao, H. Li, X. Liu // Applied Optics. — 2017. — Vol. 56. — № 34. — P. 9390–9397.
- [4] **Гуськов, И. А.** Методика расчета голограммного дисплея с учетом дифракционной эффективности объемно-фазовой голограммы / И. А. Гуськов, Э. Р. Муслимов, А. Н. Мельников, А. Р. Гильфанов // Оптический Журнал. — 2020. — Том 87. — № 11. — С. 21–30.
- [5] **Kogelnic, H.** [Coupled wave analysis for thick hologram gratings](#) / H. Kogelnic // The Bell System Technical Journal. — 1969. — Vol. 48. — № 9. — P. 2909–2947.