

УДК 535.41: 778.38

https://doi.org/10.33619/2414-2948/95/01

МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕ ГОЛОГРАММ НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ

©Жумалиев К. М., д-р техн. наук, акад. НАН Кыргызской Республики, Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан, zhum_k_m@mail.ru

©Исманов Ю. Х., ORCID: 0000-0001-8176-2602, SPIN-код: 1183-7001, д-р физ.-мат. наук, Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан, i_yusupjan@mail.ru

©Алымкулов С. А., д-р техн. наук, Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан, salmor54@mail.ru

MULTIPLEXING OF HOLOGRAMS BASED ON SPATIAL SEPARATION

©Zhumaliev K., Dr. habil., Academician of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Kyrgyz State Technical University named after I.Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan, zhum_k_m@mail.ru

©Ismanov Yu., ORCID: 0000-0001-8176-2602, SPIN-code: 1183-7001, Dr. habil., Kyrgyz State Technical University named after I.Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan, i_yusupjan@mail.ru

©Alymkulov S., Dr. habil., Kyrgyz State Technical University named after I.Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan, salmor54@mail.ru

Аннотация. Проведен анализ методов мультиплексирования с использованием пространственного разделения. Показано, что мультиплексирование с пространственным разделением возможно тогда, когда отсутствует действие Брэгговской выборки. Отдельно рассмотрено действие Брэгговской выборки, его особенностей для случаев тонкослойных плоских голограмм и в достаточно толстой среде объемных голограмм. Среди методов мультиплексирования с использованием пространственного разделения рассмотрены методы мультиплексирования фрактального типа и вращательного мультиплексирования. Мультиплексирования фрактального типа позволяет, при использовании его одновременно с мультиплицированием углового типа, записывать до 6000 голограмм на одном участке, причем общий объем среды хранения остается одним и тем же. Вращательное мультиплексирование является частным случаем мультиплексирования фрактального типа. Данный тип мультиплексирования особенно эффективен для хранения голограмм в достаточно тонкослойных средах. Подобно мультиплексированию фрактального типа в данном типе мультиплексирования необходимой опорной волной восстанавливаются одновременно более одной голограммы. Однако, только результат восстановления одной голограммы оказывается несмещенным и фиксируется матрицей ПЗС. Отличием данного метода от мультиплексирования фрактального типа является то, что смещение во вращательном мультиплексировании является результатом вращения среды хранения.

Abstract. The analysis of multiplexing methods using spatial separation has been carried out. It is shown that space division multiplexing is possible when there is no Bragg sampling action. The

action of the Bragg sampling, its features for the cases of thin-layer flat holograms and in a sufficiently thick medium of volume holograms are considered separately. Among the methods of multiplexing using spatial selection, the methods of fractal type multiplexing and rotational multiplexing are considered. Fractal-type multiplexing allows, when used simultaneously with angular-type multiplexing, up to 6000 holograms to be recorded in one area, while the total volume of the storage medium remains the same. Rotational multiplexing is a special case of fractal type multiplexing. This type of multiplexing is especially effective for storing holograms in rather thin-layer media. Similar to fractal-type multiplexing, in this type of multiplexing, more than one hologram is simultaneously reconstructed by the required reference wave. However, only the result of the reconstruction of one hologram turns out to be unbiased and is fixed by the CCD matrix. The difference between this method and fractal-type multiplexing is that the offset in rotational multiplexing is the result of rotation of the storage medium.

Ключевые слова: голограмма, пространственное разделение, мультиплексирование фрактального типа, вращательное мультиплексирование, Брэгговская выборка.

Keywords: hologram, spatial separation, fractal type multiplexing, rotational multiplexing, Bragg sampling.

Принцип суперпозиции — важнейшее свойство световых волн, распространяющихся в свободном пространстве. При наложении световой волны на другую волну формируется волна, являющаяся суммой двух волн. Однако, при преодолении участка, где произошло сложение двух волн, каждая из волн далее распространяется так, как если бы до этого не было никакого сложения. Суть голографии как раз и заключается в том, чтобы на первом участке распространения световых волн осуществлялась запись всего набора волн, а на следующем участке происходило полное восстановление этого набора волн без каких-либо потерь, так, как если бы записи не происходило. На практике восстановление голограмм сопровождается не только возникновением всего исходного набора волн, но и формированием дополнительных волн, которые отсутствовали в исходном наборе. По этой причине используются схемы, позволяющие отделить вновь образовавшиеся волны от исходных наборов волн. В таких схемах происходит практически полное восстановление исходных, записанных на голограмму волн.

Любой объект при записи его на голограмму может быть представлен как совокупность большого количества точек, каждая из которых является источником волны, распространяющейся к плоскости записи. По сути, любую голограмму можно рассматривать как наложение, или мультиплицирование, голограмм от отдельных точек, при условии, что все точки излучают волны одновременно. Важным условием отсутствия искажений при взаимодействии волн от различных точек является взаимодействие волны от каждой точки со своей частью опорной волны [1, 2].

Только суперпозиция голограмм от всех точек не является условием получения не перекрытых изображений объектов. Также важным условием является необходимость восстановления исходных изображений в разных точках пространства или в разные моменты времени. В системах голографической памяти происходит постраничная запись информации (изображений), причем страницы поступают через неподвижный, но меняющий содержание страницы пространственный модулятор света. В процессе восстановления происходит постраничная подача информации на фотоматрицу (прибор с зарядовой связью — ПЗС). ПЗС

регистрирует пространственное распределение светового поля, соответствующее распределению сформированному пространственным модулятором света. Наложение голограмм, которое происходит при многократной записи на одну ту же среду многих голограмм, т. е. процесс мультиплексирования, является не единственным условием записи голограмм. Также важным условием является то, что записываемый объект находился в одной и той же точке пространства, хотя опорная волна, используемая при записи может падать на плоскость записи под разными углами, отдельные страницы данных должны формироваться на один и тот же участок пространства, не перекрываясь другими страницами. Важным условием сохранности записываемых данных является то, что каждая страница данных должна восстанавливаться только определенным, своим пучком света, а любой другой пучок никоим образом не влиял на данную страницу. Мультиплексирование – это метод записи и восстановления данных, при котором формируется набор волн, причем восстановление каждой страницы происходит только отдельной из этих волн, и только ей.

Метод мультиплексирования позволяет записать в заданную фиксирующую среду максимально возможный объем данных, причем этот объем ограничен только физическими возможностями записываемой среды и его размерами. Несомненное преимущество метода мультиплексирования состоит в том, что он позволяет использовать не только площадь записываемой среды, но и ее толщину. Тем не менее, метод мультиплексирования позволяет максимально эффективно использовать даже тонкую записываемую среду.

В мультиплексировании голограмм используются два широких класса методов [3–5]:

Фиксация информации с пространственным разделением. При восстановлении мультиплексированной голограммы восстанавливающая волна обычно возбуждает световые волны от более чем одной из множества голограмм в мультиплексе. По этой причине необходимо создавать условия, когда волны от каждой из голограмм в мультиплексе не перекрываются. В этом случае подбором соответствующих диафрагм реализуется условие, когда пропускается только одна из восстановленных волн, т. е. одна страница информации. Восстановленная таким образом страница с данными фиксируется с помощью ПЗС. Рассмотренный способ удобен для всех типов голограмм — тонких и толстых, и он лежит в основе метода фрактального мультиплексирования.

Фиксация информации с Брэгговским согласованием. При данном условии происходит восстановление только той страницы записанной информации, волна от которой удовлетворяет условию Брэгговского согласования. Восстановление всех других голограмм невозможно, так они не удовлетворяют этому условию. Однако, условие Брэгговского согласования применимо только для толстых голограмм. Методы, основывающиеся на условии Брэгговского согласования используют угловое, по длине волны, кодирование фазы, что является необходимым для этих методов.

Мультиплексирование с использованием пространственного разделения осуществляется только в толстослойных голограммах посредством изменения направления опорной волны и восстанавливающего пучка в плоскости, перпендикулярной к плоскости, в которой лежат оптическая ось и направление объектной волны.

В некоторых источниках [6–8] в качестве мультиплексных голограмм рассматривают и не наложенные голограммы, а голограммы, расположенные в одной плоскости на одной и той же среде на разных ее участках. Такой подход называют пространственным мультиплексированием. *Целью данной работы* является анализ методов мультиплексирования голограмм с использованием пространственного разделения.

Методы мультиплексирования, использующие пространственное разделение

При отсутствии Брэгговского согласования реализуется метод мультиплексирования на основе пространственного разделения. В случае записи тонких голограмм, которые можно представить, как результат наложения плоских голографических решеток, изменение угла падения или плоскости падения опорной волны относительно опорной волны вызывает не рассеяние восстановленной волны, вплоть до ее полного исчезновения, а к изменению ее направления на заданный угол в исходной плоскости или на переход в другую плоскость. Если при записи наложенных голограмм таким образом, что при не меняющейся объектной волне, которая содержит информацию обо всех информационных страницах, угол опорной волны будут изменять, то при восстановлении полученной мультиплексной голограммы любым из исходных опорных пучков происходит восстановление всех наложенных голограмм, однако, волны, соответствующие разным голограммам, распространяются под разными углами. На приемную ПЗС-матрицу попадает только одна из них, при условии, что углы между исходными опорными волнами были достаточно велики. Брэгговская выборка действует только в достаточно толстослойной среде, причем при условии, когда угол падения опорной волны изменяется в плоскости, в которой лежат нормаль и объектная записывающая волна. Если указанный угол сохраняется, то при перемещении в этой плоскости восстанавливающей волны в направлении, нормальном этой плоскости, будет происходить перемещение в соответствующем направлении и восстановленной волны. В этом случае, также, как и в случае тонких голограмм можно при помощи разных опорных волн произвести запись и восстановление нескольких изображений, однако, в каждом случае фотоматрица (ПЗС) фиксирует только одно изображение (Рисунок 1).

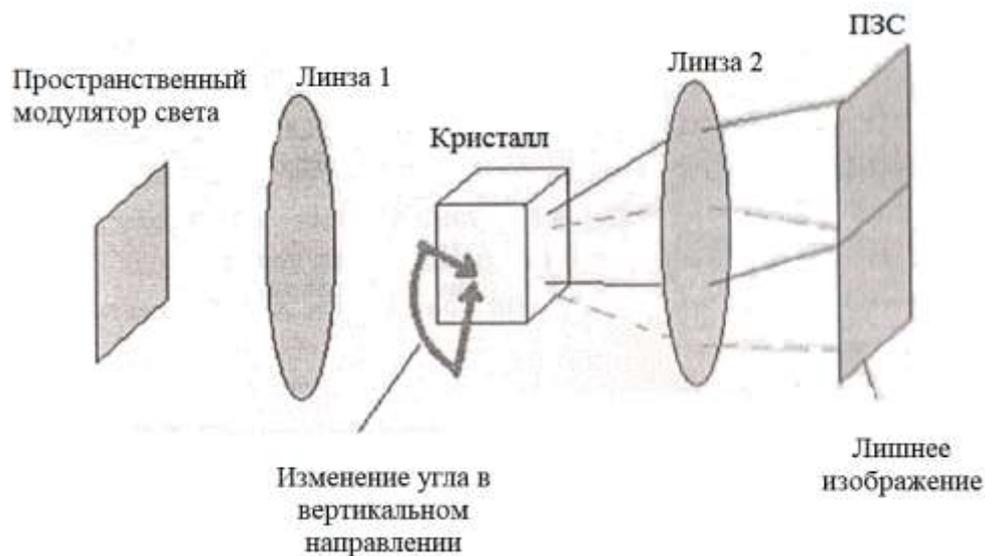


Рисунок 1. Мультиплексирование фрактального типа в толстослойной структуре

На Рисунке 1 представлена схема записи двумя опорными волнами, которые представлены в виде векторов. Нижний вектор расположен в горизонтальной плоскости, в которой находится и объектная волна. Две опорные волны — верхняя и нижняя, образуют вертикально расположенную плоскость, нормальную по отношению к первой плоскости. Если запись каждой из голограмм происходила своей опорной волной, то при восстановлении возникают не только голограммы, но и соответствующие им опорные волны. Такой результат объясняется тем, что угловая выборка для изменений угла в вертикальном

направлении достаточно велика. По этой причине часто вертикальное направление называют вырожденным направлением.

В схеме каждая опорная волна восстанавливает обе голограммы, хотя желательно, чтобы каждая волна восстанавливала только свою голограмму. Однако, в этом случае лишняя или дополнительная восстановленная волна не направляется вдоль оси объектной волны. Она наклонена в вертикальной плоскости под тем же углом, который разделял две опорные волны. В том случае, когда этот угол больше, чем угловая частотная ширина объекта в вертикальном направлении, изображение, формируемое при восстановлении лишней голограммы, не попадает на приемную фотоматрицу. Т. е. матрица ПЗС фиксирует только требуемое изображение. Важным свойством мультиплексных голограмм является их инвариантность к масштабу, что и определило название термина «мультиплексирование фрактального типа» [9, 10].

Мультиплексирование фрактального типа сопровождалось мультиплексированием угла, целью чего было сохранение до 6000 голограмм на одном участке, причем общий объем среды хранения оставался одним и тем же [11–12].

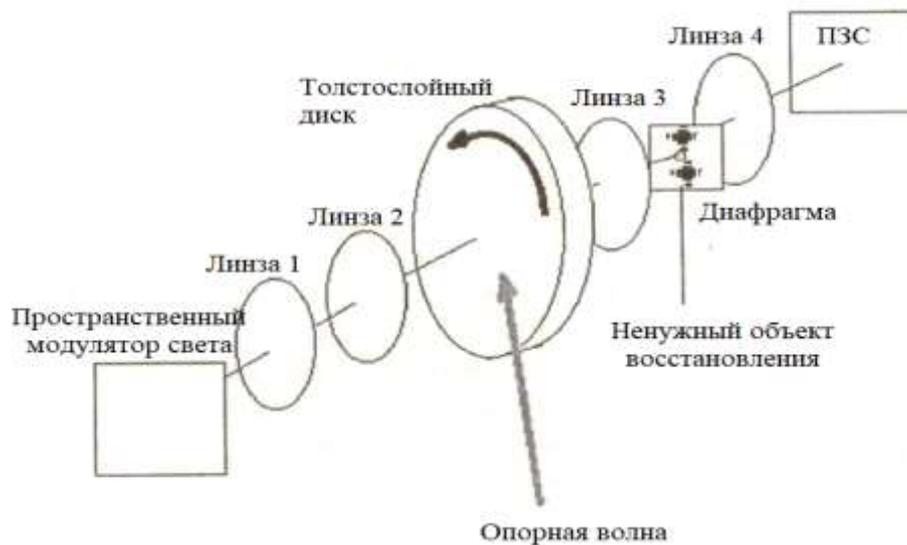


Рисунок 2. Вращательное мультиплексирование в толстослойной структуре

Мультиплексирование вращательного типа можно рассматривать как частный случай мультиплексирования фрактального типа (Рисунок 2). Данный тип мультиплексирования особенно эффективен для хранения голограмм в достаточно тонкослойных средах. Подобно мультиплексированию фрактального типа в данном типе мультиплексирования необходимой опорной волной восстанавливаются одновременно более одной голограммы. Однако, только результат восстановления одной голограммы оказывается несмещенным и фиксируется матрицей ПЗС. Отличием данного метода от мультиплексирования фрактального типа является то, что смещение во вращательном мультиплексировании является результатом вращения среды хранения. Из Рисунка 2 видно, что результаты восстановления ненужных голограмм отфильтровываются специальной диафрагмой, сохраняя при этом выделение и фиксацию матрицей ПЗС только нужной страницы информации.

На размер диафрагмы при записи информации в тонкослойных средах сильно влияет разрешение пространственного модулятора света, а вот толщина среды записи никак не определяет этот размер. Возможный путь увеличения информационной емкости толстослойных сред записи — это комбинация вращательного и углового

мультиплексирований. Впервые вращательное мультиплексирование получило практическое использование в 1995 г. для хранения 1200 изображений тонких голограмм, что позволило добиться плотности записи в 11 бит/мкм². В рассмотренном случае были использованы 120 мкм фотополимерные пленки. В фотополимерной пленке указанной толщины можно было бы сохранить не более 10–15 голограмм в случае использования только углового мультиплексирования без вращательного мультиплексирования.

Существенным недостатком вращательного мультиплексирования является то, что, вращение диска вокруг собственной оси не позволяет реализовать поворот вокруг участка, на котором происходит запись голограмм, т. е. происходит процесс мультиплексирования. Для осуществления такого поворота необходимо вращение диска сопровождать вращением непосредственно опорной волны. Это приводит к значительному усложнению конструкции считывающего и записывающего устройства. Т. е. для одновременного использования вращательного и углового мультиплексирований необходимо, чтобы вся система линз имела возможность осуществлять вращение вокруг нормали к толстослойному диску.

Выводы

Проведен анализ методов мультиплексирования с использованием пространственного разделения. Показано, что мультиплексирование с пространственным разделением возможно тогда, когда отсутствует действие Брэгговской выборки. Отдельно рассмотрено действие Брэгговской выборки, его особенностей для случаев тонкослойных плоских голограмм и в достаточно толстой среде объемных голограмм.

Среди методов мультиплексирования с использованием пространственного выделения рассмотрены методы мультиплексирования фрактального типа и вращательного мультиплексирования.

Мультиплексирования фрактального типа позволяет, при использовании его одновременно с мультиплицированием углового типа, записывать до 6000 голограмм на одном участке, причем общий объем среды хранения остается одним и тем же.

Вращательное мультиплексирование является частным случаем мультиплексирования фрактального типа. Данный тип мультиплексирования особенно эффективен для хранения голограмм в достаточно тонкослойных средах. Подобно мультиплексированию фрактального типа в данном типе мультиплексирования необходимой опорной волной восстанавливаются одновременно более одной голограммы. Однако, только результат восстановления одной голограммы оказывается несмещенным и фиксируется матрицей ПЗС. Отличием данного метода от мультиплексирования фрактального типа является то, что смещение во вращательном мультиплексировании является результатом вращения среды хранения.

Список литературы:

1. Jeon S. H., Gil S. K. Proposal for optical one-time password authentication using digital holography // Journal of the Optical Society of Korea. 2016. V. 20. №6. P. 722-732. <https://doi.org/10.3807/JOSK.2016.20.6.722>
2. Rivenson Y., Stern A., Javidi B. Improved depth resolution by single-exposure in-line compressive holography // Applied optics. 2013. V. 52. №1. P. A223-A231. <https://doi.org/10.1364/AO.52.00A223>
3. Xue K., Li Q., Li Y. D., Wang Q. Continuous-wave terahertz in-line digital holography // Optics Letters. 2012. V. 37. №15. P. 3228-3230. <https://doi.org/10.1364/OL.37.003228>
4. Gross M. Heterodyne holography with full control of both the signal and reference arms //

Applied optics. 2016. V. 55. №3. P. A8-A16. <https://doi.org/10.1364/AO.55.0000A8>

5. Jiang Z., Veetil S. P., Cheng J., Liu C., Wang L., Zhu J. High-resolution digital holography with the aid of coherent diffraction imaging // Optics Express. 2015. V. 23. №16. P. 20916-20925. <https://doi.org/10.1364/OE.23.020916>

6. Wang Z., Jiang Z., Chen Y. Single-shot dual-wavelength phase reconstruction in off-axis digital holography with polarization-multiplexing transmission // Applied Optics. 2016. V. 55. №22. P. 6072-6078. <https://doi.org/10.1364/AO.55.006072>

7. Jeon P., Lee H., Kim J., Liu C., Kim D. Analysis of three-dimensional mapping problems in incoherent digital holography // Optics Express. 2020. V. 28. №4. P. 4501-4515. <https://doi.org/10.1364/OE.384477>

8. Van Rooij J., Kalkman J. Sub-millimeter depth-resolved digital holography // Applied Optics. 2017. V. 56. №25. P. 7286-7293. <https://doi.org/10.1364/AO.56.007286>

9. Исманов Ю. Х., Исмаилов Д. А., Жумалиев К. М., Алымкулов С. А. Эффект саморепродуцирования в голографии // Материалы VI Международной конференции по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2017. С. 646-647.

10. Исманов Ю. Х., Тынышова Т. Д., Алымкулов С. А. Использование приближения Френеля для расчета распределения светового поля, прошедшего сквозь решетку // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. 2017. №3. С. 171-178. EDN YSYMKA.

11. Исманов Ю. Х., Тынышова Т. Д., Абдулаев А. А. Моделирование оптической системы, работающей при некогерентном освещении // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. №3. С. 98-102.

12. Исманов Ю. Х. Голографический эффект Тальбота в интерферометрии // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2015. Т. 15. №5. С. 104-106.

References:

1. Jeon, S. H., & Gil, S. K. (2016). Proposal for optical one-time password authentication using digital holography. *Journal of the Optical Society of Korea*, 20(6), 722-732. <https://doi.org/10.3807/JOSK.2016.20.6.722>

2. Rivenson, Y., Stern, A., & Javidi, B. (2013). Improved depth resolution by single-exposure in-line compressive holography. *Applied optics*, 52(1), A223-A231. <https://doi.org/10.1364/AO.52.00A223>

3. Xue, K., Li, Q., Li, Y. D., & Wang, Q. (2012). Continuous-wave terahertz in-line digital holography. *Optics Letters*, 37(15), 3228-3230. <https://doi.org/10.1364/OL.37.003228>

4. Gross, M. (2016). Heterodyne holography with full control of both the signal and reference arms. *Applied optics*, 55(3), A8-A16. <https://doi.org/10.1364/AO.55.0000A8>

5. Jiang, Z., Veetil, S. P., Cheng, J., Liu, C., Wang, L., & Zhu, J. (2015). High-resolution digital holography with the aid of coherent diffraction imaging. *Optics Express*, 23(16), 20916-20925. <https://doi.org/10.1364/OE.23.020916>

6. Wang, Z., Jiang, Z., & Chen, Y. (2016). Single-shot dual-wavelength phase reconstruction in off-axis digital holography with polarization-multiplexing transmission. *Applied Optics*, 55(22), 6072-6078. <https://doi.org/10.1364/AO.55.006072>

7. Jeon, P., Lee, H., Kim, J., Liu, C., & Kim, D. (2020). Analysis of three-dimensional mapping problems in incoherent digital holography. *Optics Express*, 28(4), 4501-4515. <https://doi.org/10.1364/OE.384477>

8. Van Rooij, J., & Kalkman, J. (2017). Sub-millimeter depth-resolved digital holography. *Applied Optics*, 56(25), 7286-7293. <https://doi.org/10.1364/AO.56.007286>
9. Ismanov, Yu. Kh., Ismailov, D. A., Zhumaliev, K. M., & Alymkulov, S. A. (2017). Effekt samoreproduktivnosti v golografii. In *Materialy VI Mezhdunarodnoi konferentsii po fotonike i informatsionnoi optike: sbornik nauchnykh trudov, Moscow*, 646-647. (in Russian)
10. Ismanov, Yu. Kh., Tynyshova, T. D., & Alymkulov, S. A. (2017). Ispol'zovanie priblizheniya Frenelya dlya rascheta raspredeleniya svetovogo polya, proshedshego skvoz' reshetku. *Vestnik Kyrgyzskogo gosudarstvennogo universiteta stroitel'stva, transporta i arkhitektury im. N. Isanova*, (3), 171-178. (in Russian). EDN YSYMKA.
11. Ismanov, Yu. Kh., Tynyshova, T. D., & Abdulaev, A. A. (2020). Modelirovanie opticheskoi sistemy, rabotayushchei pri nekogerentnom osveshchenii. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*, (3), 98-102. (in Russian)
12. Ismanov, Yu. Kh. (2015). Golograficheskiy effekt Tal'bota v interferometrii. *Vestnik Kyrgyzsko-Rossiiskogo Slavyanskogo universiteta*, 15(5), 104-106. (in Russian)

Работа поступила
в редакцию 31.08.2023 г.

Принята к публикации
08.09.2023 г.

Ссылка для цитирования:

Жумалиев К. М., Исманов Ю. Х., Алымкулов С. А. Мультиплексирование голограмм на основе пространственного разделения // Бюллетень науки и практики. 2023. Т. 9. №10. С. 10-17. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/95/01>

Cite as (APA):

Zhumaliev, K., Ismanov, Yu., & Alymkulov, S. (2023). Multiplexing of Holograms Based on Spatial Separation. *Bulletin of Science and Practice*, 9(10), 10-17. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/95/01>