Т. 12. №11 2026
https://doi.org/10.33619/2414-2948/132

УДК 535.41: 778.38 https://doi.org/10.33619/2414-2948/132/19

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ ЗАПОМИНАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА: ОТ ПРИНЦИПОВ К ИНЖЕНЕРНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

©***Алымкулов С. А.***, *SPIN-код: 2120-3954, д-р техн. наук, , Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан, salmor54@mail.ru*
©***Жумалиев К. М.***, *SPIN-код: 6579-1960, д-р техн. наук, академик НАН КР, 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*
©***Тынышова Т. Д.,*** *ORCID: 0009-0007-5235-7115, SPIN-код: 9917-4190, канд. физ.-мат. наук, Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан, ttynyshova@mail.ru*

HOLOGRAPHIC DATA STORAGE DEVICES: FROM PRINCIPLES TO ENGINEERING REALITY

©***Alymkulov S.***, *SPIN-code: 2120-3954, Dr. habil., Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan, salmor54@mail.ru*
©***Zhumaliev K.,*** *SPIN-code: 6579-1960, Dr. habil., 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*
©***Tynyshova T.***, *ORCID: 0009-0007-5235-7115, SPIN-код: 9917-4190, Ph.D., Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan, ttynyshova@mail.ru*

Аннотация. Рассматриваются фундаментальные принципы голографических запоминающих устройств: объёмная запись, Брэгговская селективность и методы мультиплексирования. Анализируются классы материалов (фоторефрактивные кристаллы, фотополимеры), их преимущества и ограничения. Обсуждаются современные вызовы: перекрёстные помехи, энергоэффективность и масштабируемость, препятствующие массовому внедрению технологии.

Abstract. Examines the fundamental principles of holographic data storage devices: volume recording, Bragg selectivity, and multiplexing methods. The classes of materials (photorefractive crystals, photopolymers), their advantages and limitations are analyzed. Contemporary challenges are discussed: cross-talk, energy efficiency, and scalability that hinder the mass adoption of the technology.

Ключевые слова: голографическая память, объёмная запись, брэгговская селективность, мультиплексирование, фотополимеры.

Keywords: holographic memory, volume recording, Bragg selectivity, multiplexing, photopolymers.

Представьте себе носитель данных размером с сахарный кубик, способный вместить всю Библиотеку Конгресса США, с возможностью чтения информации со скоростью, в тысячи раз превышающей скорость современных жестких дисков. Это обещание, которое

Тип лицензии CC: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Т. 12. №11 2026
https://doi.org/10.33619/2414-2948/132

голографические запоминающие устройства несут уже более полувека. Идея, впервые предложенная Питером ван Херденом в 1960-х годах [9], казалась фантастикой: записывать и считывать целые страницы данных одновременно, используя объём всей толщины носителя, а не только его поверхность.

Сегодня, когда прогнозируется рост мирового объёма данных с 175 зеттабайт в 2025 году до более чем 1000 зеттабайт к 2030 году [1], а традиционные технологии хранения — магнитные и твердотельные накопители — начинают достигать своих физических пределов, голографическая память возвращается в центр внимания. Однако путь от лабораторного эксперимента до промышленного решения оказался значительно сложнее, чем предполагали энтузиасты 1990-х годов. В этой статье мы рассмотрим современное состояние голографических запоминающих устройств, анализируя фундаментальные принципы, ключевые технологические достижения и вызовы, которые до сих пор препятствуют массовому внедрению этой технологии.

Принцип работы: от страниц данных к объёмным голограммам. В основе голографического хранения данных лежит принципиально иной подход по сравнению с традиционными оптическими дисками. Вместо записи отдельных битов на поверхности диска, голографическая память работает с двумерными массивами данных — «страницами данных». Информация, закодированная в виде оптического сигнала с помощью пространственного модулятора света (SLM), интерферирует с опорным пучком внутри объёма светочувствительного материала. В результате этой интерференции формируется сложная трёхмерная решётка — голограмма, которая сохраняет как амплитуду, так и фазовое распределение записанной страницы. Считывание происходит по принципу дифракции: при освещении записанной голограммы опорным пучком восстанавливается исходная страница данных, которая затем фиксируется матричным фотодетектором (CCD или CMOS-камерой). Ключевым свойством объёмных голограмм является их высокая селективность — так называемая брэгговская избирательность. Это означает, что голограмма эффективно взаимодействует только с опорным пучком, имеющим строго определённый угол падения или длину волны. Именно это свойство позволяет записывать множество голограмм в одном и том же физическом объёме, изменяя параметры опорного пучка — так работает мультиплексирование [1, 7].

Основываясь на архитектуре оптической системы, современные голографические запоминающие устройства можно разделить на несколько типов. Классическая внеосевая схема, где сигнальный и опорный пучки пересекаются под углом внутри носителя, обеспечивает минимальные перекрёстные помехи, но чувствительна к вибрациям и требует высокой механической стабильности [2, 3].

Соосная схема, предложенная компанией Optware в 2005 году, использует один оптический путь для обоих пучков, что значительно упрощает конструкцию и повышает устойчивость системы. Однако в соосной схеме сигнальный и опорный пучки частично перекрываются, что создаёт проблемы с шумами и требует сложной фильтрации [4].

Новым словом в развитии архитектуры стала самореферентная голография (self-referenced holography — SRH). Эта технология использует всего один пучок, формируя голограмму за счёт интерференции между различными пикселями самого сигнального пучка [3].

Хотя это ограничивает область применения (не позволяет восстанавливать волновой фронт в полном смысле), SRH обеспечивает беспрецедентную стабильность системы и открывает возможности для интеграции функций хранения и обработки данных в едином устройстве [1].

Тип лицензии CC: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Т. 12. №11 2026
https://doi.org/10.33619/2414-2948/132

Материалы: сердце голографической памяти. Способность материала эффективно и стабильно хранить голографическую запись является критическим фактором, определяющим практическую применимость технологии. За десятилетия исследований были опробованы различные классы материалов, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Фоторефрактивные кристаллы, такие как ниобат лития ($LiNbO_3$), стали первыми материалами, продемонстрировавшими возможность многократной перезаписи голограмм. В этих кристаллах под действием света возникает пространственное перераспределение заряда, создающее внутреннее электрическое поле и изменяющее показатель преломления. Однако кристаллические материалы требуют высоких напряжений для записи, а сохранность записанной информации может нарушаться при считывании. Фотополимеры стали настоящим прорывом, приблизив голографическую память к коммерческой реализации. Эти органические материалы обеспечивают высокую дифракционную эффективность, сравнительно просты в производстве и позволяют создавать носители с длительным сроком хранения. Компании Aprilis и InPhase Technologies использовали фотополимеры в своих прототипах, демонстрируя срок хранения до нескольких десятилетий. Однако фотополимеры имеют ограниченный динамический диапазон, что накладывает ограничения на количество страниц, которое можно записать в одной точке, и, как правило, работают в режиме однократной записи [5, 6].

Ключевой проблемой фотополимеров является объёмная усадка — уменьшение толщины материала в процессе полимеризации. Как отмечается в обзорной работе Ye с соавторами (2026) [5], усадка возникает из-за увеличения плотности при переходе мономеров в полимерную сетку, что приводит к расстройке решётки и перекрёстным помехам между страницами. Значительные успехи в решении этой проблемы были достигнуты с использованием нанодопирования. В системе PQ/PMMA (базовый фотополимерный материал для голографической памяти) легирование фуллереном C60 при оптимальной массовой доле (0.001%) позволило снизить усадку с ~0.4% до ~0.1%, одновременно увеличив дифракционную эффективность с ~50% до ~80%. В акрилатных системах допирование наночастицами CeO_2 (массовая доля 0.05%) снижает усадку с 0.357% до 0.186% при повышении дифракционной эффективности до 80.1%. В системах акриламид/поливиниловый спирт допирование наночастицами TiO_2 позволило снизить усадку с 3.21% до 0.80% при увеличении дифракционной эффективности с 78.6% до 92.3%. Дихромированный желатин (DCG) остаётся одним из наиболее эффективных материалов для создания высококачественных голографических оптических элементов благодаря высокой разрешающей способности и дифракционной эффективности. Однако чувствительность к влажности и сложность технологического процесса ограничивают её применение в системах хранения данных.

Технологии мультиплексирования: как достичь высокой плотности. Истинная мощь голографической памяти раскрывается через технологии мультиплексирования — методы записи множества страниц данных в одном физическом объёме. Как подчёркивается в обзорной работе Zheng с соавторами (2025) [1], эти методы являются ключом к достижению высокой плотности хранения и подразделяются на две основные категории: пространственное мультиплексирование и ортогональное/некогерентное кодовое мультиплексирование. Пространственное мультиплексирование использует механическое перемещение или поворот либо носителя, либо опорного пучка.

Угловое мультиплексирование — наиболее изученный метод [15-16]. Изменяя угол падения опорного пучка, можно записать сотни и даже тысячи страниц в одной точке носителя. В работе [9] авторы продемонстрировали хранение 500 голограмм в одном объёме с использованием этого метода. Однако угловое мультиплексирование требует исключительно

Тип лицензии CC: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Т. 12. №11 2026
https://doi.org/10.33619/2414-2948/132

точных механизмов позиционирования и чувствительно к температурным деформациям. В работе [10] исследователи предложили использование фотополимеров, допированных наночастицами золота, для повышения эффективности записи.

Синхронно-угловое мультиплексирование, при котором материал поворачивается в процессе записи, было продемонстрировано на толстом PQ/PMMA фотополимере [10]: 150 серых изображений были записаны с плотностью 41.1 ГБ/см³.

Сдвиговое мультиплексирование основано на свойстве Брэгговской селективности в пространственной области [17]. При смещении носителя относительно записывающего пучка на расстояние, меньшее диаметра пучка, новая голограмма может быть записана, не разрушая соседние. Этот метод был предложен Psaltis и его коллегами из Калифорнийского технологического института в 1994 году [11]. В работе [12] авторы предложили параксиальные уравнения для анализа сдвиговой селективности в соосных голографических системах. В работе [13] был предложен метод трёхмерного сдвигового мультиплексирования для самореферентных систем.

Вращательное мультиплексирование, предложенное Curtis с соавторами в 1994 году [14], использует поворот материала или эквивалентный поворот записывающих пучков. Ортогональное/некогерентное кодовое мультиплексирование оперирует не пространственными координатами, а свойствами самого света. Амплитудное и фазовое кодирование использует модуляцию опорного пучка сложными фазовыми масками. Каждая маска создаёт уникальную интерференционную картину, позволяя записывать голограммы, которые могут быть считаны только при использовании соответствующей маски.

Поляризационное мультиплексирование использует различные состояния поляризации опорного пучка, что в сочетании с поляризационно-чувствительными материалами даёт дополнительную степень свободы для мультиплексирования. Важно отметить, что эти методы не исключают друг друга: современные системы всё чаще используют гибридные схемы, комбинируя, например, угловое и сдвиговое мультиплексирование для достижения максимальной плотности записи.

Голографическая обработка информации: от хранения к вычислениям. Параллелизм, присущий голографическим системам, делает их естественными кандидатами не только для хранения, но и для обработки информации. Голографическая ассоциативная память была предложена ещё в 1970-х годах, и эта идея переживает ренессанс в контексте развития оптических нейронных сетей. Ключевым преимуществом голографических вычислительных систем является возможность выполнения операций умножения матриц на вектор (MAC-операций) со скоростью света, без затрат электроэнергии на пересылку данных между памятью и процессором — проблема, известная как «узкое место фон Неймана». В работе Hwang с соавторами (1989) [4] представлена оптическая реализация голографической ассоциативной памяти на основе двумерной нейросетевой модели с использованием коммерческого жидкокристаллического пространственного модулятора света. Система, построенная на основе коррелятора Вандер-Люгта с плоскостным Фурье-голограммами и массивом пиновых отверстий, демонстрирует возможность ассоциативного распознавания образов с обратной связью. В диссертационной работе Hsu (1990) [8] представлены оптические реализации нейронных сетей для ассоциативной памяти, включая сеть Хопфилда для автоассоциации и двухслойную сеть с обратной связью для гетероассоциации.

Современные вызовы и критические ограничения. Несмотря на впечатляющие успехи, голографическая память до сих пор не стала мейнстримной технологией. Существует ряд фундаментальных и инженерных проблем, которые необходимо преодолеть.

Тип лицензии CC: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Т. 12. №11 2026
https://doi.org/10.33619/2414-2948/132

1. Перекрёстные помехи являются одним из наиболее серьёзных препятствий. Как отмечается в литературе, перекрёстные помехи снижают ёмкость современных голографических систем хранения почти на два порядка от теоретического предела. Они возникают из-за расширения или сжатия среды хранения во время и после процесса записи голограмм. Хотя тепловое расширение относительно невелико для фоторефрактивных кристаллов, для органических полимеров оно значительно больше. Фотоиндуцированная полимеризационная усадка является одним из доминирующих ограничений для объёмных голографических запоминающих устройств с использованием органических полимеров.

2. Энергоэффективность: Как показал проект Microsoft Research, энергопотребление голографических систем не ограничивается записью. Поддержание данных в рабочем состоянии требует периодического «освежения» и сборки мусора. Совместная оптимизация параметров на уровне материалов и на уровне системы позволила улучшить энергоэффективность в 14 раз в экспериментах Microsoft Research, но, по оценкам исследователей, необходим ещё 1-2 порядка повышения, чтобы конкурировать с существующими технологиями.

3. Масштабируемость и стоимость: Создание высокопроизводительных систем сдвигового мультиплексирования без механического перемещения остаётся сложной инженерной задачей. Пока что доступные системы не могут обеспечить сочетание высокой плотности, масштабируемости и низкой стоимости, необходимое для конкуренции с HDD и SSD в облачных центрах обработки данных.

Выводы

Голографические запоминающие устройства прошли долгий путь от теоретических построений до сложных прототипов, демонстрирующих впечатляющие показатели плотности и скорости. Фундаментальные принципы — объёмная запись, Брэгговская селективность, параллельное считывание — остаются непревзойдёнными по своему потенциалу. Однако практическая реализация сталкивается с системными проблемами энергоэффективности, стоимости и надёжности, которые пока не позволяют голографической памяти занять доминирующее положение на рынке.

Тем не менее, эволюция технологий не стоит на месте. Появляются новые подходы, которые могут кардинально изменить ситуацию. Во второй части нашей статьи мы рассмотрим прорывные концепции и материалы, способные вывести голографическую память на новый уровень. Мы обсудим применение метаповерхностей, квантовых эффектов, интеграцию с искусственным интеллектом и практические шаги по внедрению голографической памяти в облачные архивы.

Список литературы:

1. Zheng S., Liu H., Xu X. Research Progress of Multiplexing Technology for Holographic Data Storage (Invited) // Acta Photonica Sinica. 2025. V. 54. №3. P. 0309001. https://doi.org/10.3788/gzxb20255403.0309001

2. Cheriere N., Chu J., Brennan G. Holographic Storage for the Cloud: advances and challenges // ACM Transactions on Storage. 2025. V. 21. №1. P. 3:1-3:31. https://doi.org/10.1145/3708993

3. Hsieh M.-L., Hsu K.Y., Yeh P. Effect of grating detuning on volume holographic memory using photopolymer storage media: reflection holograms // SPIE Photonics Taiwan. 2000.

4. Hwang E.I., Lee S.H., Lee W.S., Kim E.S. Optical Implementation of Nonlinear Holographic Associative Memory using LCTV Spatial Light Modulator // Journal of the Korean Institute of Telematics and Electronics. 1989.

Тип лицензии CC: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

5. Ye L., Zhang Z., Yang D., Zhu J. Advances in Improving Volume Shrinkage of Photopolymer Holographic Recording Materials (Invited) // Laser & Optoelectronics Progress. 2026. V. 63. №13. P. 1341003. https://doi.org/10.3788/LOP260842

6. Suzuki N. Improved thermal stability of volume holograms recorded in nanoparticle–polymer composite films // Optics Letters. 2008.

7. Jeong Y.-C., Lee S., Park J.-K. Holographic diffraction gratings with enhanced sensitivity based on epoxy-resin photopolymers // Optics Express. 2007. V. 15. №4. P. 1497-1504. https://doi.org/10.1364/OE.15.001497

8. Hsu K. Optical neural computing for associative memories // PhD Thesis, California Institute of Technology, 1990.

9. Van Heerden P.J. Theory of optical information storage in solids // Applied Optics. 1963. V. 2. №4. P. 393-400.

10. Levene M., Psaltis D. Optics in neural computation // PhD Thesis, California Institute of Technology, 1999.

11. Li H., Psaltis D. Three-dimensional holographic disks. Applied Optics. 1994.

12. Márquez A., Li C., Beléndez A. Information multiplexing from optical holography to multi-channel metaholography // Nanophotonics. 2023. V. 12. №24. P. 4415-4440. https://doi.org/10.1515/nanoph-2023-0546

13. Wu J., Peng L., Wu H. Methods and Strategies for Enhancing the Performance of PQ/PMMA Photopolymers for Holographic Data Storage // Polymers. 2026. V. 18. №9. P. 1053-1065. https://doi.org/10.3390/polym18091053

14. Curtis K., Pu A., Psaltis D. Method for holographic storage using peristrophic multiplexing // Optics Letters. 1994. V. 19. №13. P. 993-994. https://doi.org/10.1364/OL.19.000993

15. Исманов Ю. Х., Тынышова Т. Д. Уменьшение объема вводимых данных при компьютерной обработке интерферограмм // Материалы VIII Международной конференции по фотонике и информационной оптике. М., 2019. С. 695-696.

16. Исманов Ю. Х., Тынышова Т. Д. Улучшение характеристик интерферограмм, получаемых на выходе голографического интерферометра // Материалы X Международной конференции по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М., 2021. С. 445-446.

17. Исманов Ю. Х., Тынышова Т. Д. Синтез мультиплексных голограмм // Материалы XIV Международной конференции по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М., 2025. С. 681-682.

References:

1. Zheng, S., Liu, H., & Xu, X. (2025). Research Progress of Multiplexing Technology for Holographic Data Storage (Invited). *Acta Photonica Sinica, 54*(3), 0309001. https://doi.org/10.3788/gzxb20255403.0309001

2. Cheriere, N., Chu, J., & Brennan, G. (2025). Holographic Storage for the Cloud: advances and challenges. *ACM Transactions on Storage, 21*(1), 3:1-3:31. https://doi.org/10.1145/3708993

3. Hsieh, M.-L., Hsu, K.Y., & Yeh, P. (2000). Effect of grating detuning on volume holographic memory using photopolymer storage media: reflection holograms. SPIE Photonics Taiwan.

4. Hwang, E. I., Lee, S.H., Lee, W. S., & Kim, E. S. (1989). Optical Implementation of Nonlinear Holographic Associative Memory using LCTV Spatial Light Modulator. *Journal of the Korean Institute of Telematics and Electronics*.

5. Ye, L., Zhang, Z., Yang, D., & Zhu, J. (2026). Advances in Improving Volume Shrinkage of Photopolymer Holographic Recording Materials (Invited). *Laser & Optoelectronics Progress, 63*(13), 1341003. https://doi.org/10.3788/LOP260842

Тип лицензии CC: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

6. Suzuki, N. (2008). Improved thermal stability of volume holograms recorded in nanoparticle–polymer composite films. Optics Letters.

7. Jeong, Y.-C., Lee, S., & Park, J.-K. (2007). Holographic diffraction gratings with enhanced sensitivity based on epoxy-resin photopolymers. *Optics Express, 15*(4), 1497-1504. https://doi.org/10.1364/OE.15.001497

8. Hsu, K. (1990). Optical neural computing for associative memories. *PhD Thesis, California Institute of Technology.*

9. Van Heerden, P. J. (1963). Theory of optical information storage in solids. *Applied Optics, 2* (4), 393-400.

10. Levene, M., & Psaltis, D. (1999). Optics in neural computation. *PhD Thesis, California Institute of Technology.*

11. Li, H., & Psaltis, D. (1994). Three-dimensional holographic disks. Applied Optics.

12. Márquez, A., Li C., & Beléndez, A. (2023). Information multiplexing from optical holography to multi-channel metaholography. *Nanophotonics, 12*(24), 4415-4440. https://doi.org/10.1515/nanoph-2023-0546

13. Wu, J., Peng, L., & Wu, H. (2026). Methods and Strategies for Enhancing the Performance of PQ/PMMA Photopolymers for Holographic Data Storage. *Polymers, 18*(9), 1053-1065. https://doi.org/10.3390/polym18091053

14. Curtis, K., Pu, A., & Psaltis, D. (1994). Method for holographic storage using peristrophic multiplexing. *Optics Letters, 19*(13), 993-994. https://doi.org/10.1364/OL.19.000993

15. Ismanov, Yu. Kh., & Tynyshova, T. D. (2019). Umenshenie obema vvodimyh dannyh pri kompyuternoj obrabotke interferogramm (Reducing the volume of input data during computer processing of interferograms). *Materialy VIII Mezhdunarodnoj konferencii po fotonike i informacionnoj optike: sbornik nauchnyh trudov,* 695-696. (in Russian).

16. Ismanov, Yu. H., & Tynyshova, T. D. (2021). Uluchshenie harakteristik interferogramm, poluchaemyh na vyhode golograficheskogo interferometra (Improving the characteristics of interferograms obtained at the output of a holographic interferometer). *Materialy X Mezhdunarodnoj konferencii po fotonike i informacionnoj optike: sbornik nauchnyh trudov*, 445-446. (in Russian).

17. Ismanov, Yu. H., & Tynyshova, T. D. (2025). Sintez multipleksnyh gologramm (Synthesis of multiplex holograms). *Materialy XIV Mezhdunarodnoj konferencii po fotonike i informacionnoj optike: sbornik nauchnyh trudov*, 681-682. (in Russian).

Поступила в редакцию
30.08.2026 г.

Принята к публикации
11.09.2026 г.

Ссылка для цитирования:

Алымкулов С. А., Жумалиев К. М., Исманов Ю. Х., Тынышова Т. Д. Голографические запоминающие устройства: от принципов к инженерной реальности // Бюллетень науки и практики. 2026. Т. 12. №11. С. 166-172. https://doi.org/10.33619/2414-2948/132/19

Cite as (APA):

Alymkulov, S., Zhumaliev, K., Ismanov, Yu., & Tynyshova, T. (2026). Holographic Data Storage Devices: from Principles to Engineering Reality. *Bulletin of Science and Practice, 12*(11), 166-172. (in Russian). https://doi.org/10.33619/2414-2948/132/19

Тип лицензии CC: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)