НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
НАУКА И МИРОВОЗЗРЕНИЕ

УДК-535.3

ГОЛОГРАФИЯ: ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ, СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГОЛОГРАММ

Ковалевич Артём Сергеевич
научный сотрудник лаборатории оптических технологий и фотоники, Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси
Минск, Республика Беларусь.

Аннотация

В статье рассматривается голография как перспективное направление оптики, основанное на регистрации и последующем восстановлении светового волнового фронта. Раскрываются физические принципы формирования голограмм, роль интерференции и дифракции, особенности аналоговых и цифровых методов записи трёхмерной информации. Анализируются современные технологии изготовления голографических изображений, включая лазерную голографию, компьютерную обработку и применение пространственных модуляторов света. Особое внимание уделяется использованию голографии в научных исследованиях, медицине, промышленной метрологии, информационной безопасности, образовании и визуализации данных. Рассматриваются технические ограничения существующих голографических систем, проблемы качества изображения, вычислительной сложности и воспроизведения естественного трёхмерного восприятия. Обосновывается, что дальнейшее развитие цифровой фотоники, вычислительных алгоритмов и новых оптических материалов создаёт условия для расширения практического применения голографических технологий.

Ключевые слова: голография, голограмма, интерференция света, дифракция, лазерная оптика, цифровая голография, трёхмерная визуализация, фотоника.

Введение: значение голографии в современной науке

Развитие оптических технологий привело к появлению способов получения изображений, которые значительно отличаются от традиционной фотографии. Обычная фотокамера регистрирует распределение интенсивности света, поступающего от объекта, и формирует плоское изображение. Голография позволяет сохранить значительно больше информации о световом поле, включая сведения о фазе волны. Благодаря этому появляется возможность восстановить пространственную картину объекта и наблюдать его объёмные особенности.

Термин «голография» образован от греческих слов, означающих целостную запись. Такое название отражает главную особенность метода: при создании голограммы регистрируется не только яркость изображения, но и информация, необходимая для восстановления световой волны. В результате наблюдатель может воспринимать пространственную структуру объекта, изменяя положение относительно изображения.

Голография имеет значение не только для создания зрелищных трёхмерных изображений. Она применяется в точных измерениях, микроскопии, контроле качества материалов, исследовании биологических объектов и разработке систем визуализации. Современные цифровые методы позволяют обрабатывать голографическую информацию с помощью компьютеров, изменять фокусировку после регистрации и получать количественные сведения о форме и свойствах исследуемых объектов. В обзоре 2025 года, посвящённом визуализации и измерениям на основе голографии, подчёркивается расширение возможностей цифровой регистрации, количественного анализа и голографического отображения [6].

История возникновения и становления голографического метода

Основы голографии были предложены венгерским физиком Деннисом Габором в 1948 году. Первоначально метод разрабатывался в связи с задачей улучшения разрешения электронных микроскопов. Габор предложил принцип записи волнового фронта, при котором световая волна от исследуемого объекта взаимодействует с опорной волной. Полученная интерференционная картина содержит информацию, позволяющую впоследствии восстановить исходное волновое поле.

В первые годы практическое применение метода было ограничено недостаточными возможностями источников света. Для получения качественной голограммы требовались высокая когерентность излучения, механическая стабильность установки и точная регистрация интерференционной структуры. Развитие лазерной техники в 1960-х годах позволило значительно улучшить условия экспериментов и расширить возможности голографической записи.

Важную роль сыграли работы по отражательной голографии, в частности исследования Юрия Денисюка. Они способствовали созданию изображений, которые можно было наблюдать при освещении обычным белым светом. В дальнейшем голография стала самостоятельным направлением оптики, объединяющим физику света, материаловедение, вычислительную технику и инженерные методы измерений.

В 1971 году Деннис Габор получил Нобелевскую премию по физике за изобретение и развитие голографического метода. Его Нобелевская лекция подробно раскрывает ранние принципы метода и этапы его экспериментального становления [1].

Физические основы формирования голограммы

Голографическая запись основана на двух фундаментальных оптических явлениях — интерференции и дифракции. Интерференция возникает при наложении световых волн. Если две волны обладают достаточной когерентностью, в области их взаимодействия образуется устойчивая картина чередующихся максимумов и минимумов интенсивности.

При классической схеме записи лазерный луч разделяется на два направления. Первая часть освещает объект, а отражённый от него свет направляется на регистрирующую поверхность. Вторая часть образует опорный пучок, который поступает непосредственно на ту же поверхность. В результате взаимодействия объектной и опорной волн формируется сложная интерференционная структура.

Регистрирующий материал сохраняет эту структуру в виде микроскопических изменений оптических свойств или рельефа. После обработки и освещения голограммы подходящим источником света возникает дифракция, благодаря которой восстанавливается волновой фронт, соответствующий первоначальному объекту.

Принципиальное отличие голограммы от обычной фотографии состоит в том, что фотография фиксирует преимущественно интенсивность света, тогда как голографическая запись содержит сведения о взаимном соотношении фаз объектной и опорной волн. Именно эта информация обеспечивает возможность восстановления пространственных характеристик изображения.

Качество голограммы зависит от стабильности оптической схемы, характеристик лазера, чувствительности регистрирующей среды и точности обработки. Даже незначительные механические колебания во время экспозиции могут нарушить интерференционную картину. Поэтому лабораторные установки часто размещают на виброизолированных основаниях и защищают от внешних воздействий.

Основные виды и технологии создания голограмм

Голограммы различаются по способу записи, типу регистрирующего материала и методу восстановления изображения. Одним из наиболее известных видов является пропускающая голограмма. При её наблюдении свет проходит через регистрирующую структуру, а изображение формируется вследствие дифракции.

Отражательные голограммы позволяют получать пространственные изображения при освещении со стороны наблюдателя. Они широко используются в демонстрационных и декоративных целях, а также в некоторых защитных решениях. Особое значение имеют радужные голограммы, в которых цвет изображения зависит от условий освещения и положения наблюдателя.

Отдельное направление составляет цифровая голография. В отличие от традиционного способа, при котором интерференционная структура регистрируется на фотоматериале, цифровой метод использует электронные матрицы — камеры с ПЗС- или КМОП-сенсорами. Полученная информация сохраняется в виде цифрового массива и обрабатывается вычислительными средствами.

Цифровая регистрация открывает возможность математического восстановления волнового поля. Исследователь может изменять расчётную плоскость наблюдения, выполнять повторную фокусировку и анализировать фазовое распределение света. Это особенно полезно в задачах измерения микрорельефа, деформаций и оптических свойств материалов. Основные методы цифровой записи и численного восстановления голограмм подробно рассматриваются в научной литературе по цифровой голографии [7].

Современные системы также используют пространственные модуляторы света. Эти устройства управляют фазой, амплитудой или поляризацией светового поля и позволяют формировать динамические голографические изображения. В качестве перспективного направления исследуются метаповерхности — оптические структуры с элементами субволнового размера, способные изменять характеристики проходящего или отражённого излучения [9].

Цифровая голография и вычислительная реконструкция

Переход к цифровым технологиям существенно изменил характер голографических исследований. Если традиционная голограмма требует специального материала и оптической процедуры восстановления, то цифровая голограмма может быть обработана непосредственно после регистрации. Это позволяет автоматизировать анализ и использовать сложные алгоритмы для извлечения информации.

Важным преимуществом цифровой голографии является возможность численного восстановления изображения на различных расстояниях от регистрирующей плоскости. Например, если объект находится в нескольких пространственных слоях, исследователь может программно выбрать интересующую область и выполнить её фокусировку. В обычной фотографии такая возможность ограничена характеристиками оптической системы и параметрами съёмки.

Вычислительная реконструкция предполагает обработку зарегистрированной интерференционной картины. Для этого применяются алгоритмы распространения волн, преобразования Фурье, фильтрации и восстановления фазы. В зависимости от конфигурации установки используются схемы с внеосевой и осевой регистрацией.

Однако цифровой подход предъявляет высокие требования к сенсорам и вычислительной инфраструктуре. Размер пикселя, пространственное разрешение матрицы, динамический диапазон и частота регистрации непосредственно влияют на качество восстановленного изображения. Кроме того, значительный объём данных требует эффективных методов хранения и обработки.

В последние годы активно исследуются способы объединения цифровой голографии с искусственным интеллектом. Алгоритмы машинного обучения применяются для подавления шумов, улучшения восстановления фазы и автоматической классификации объектов. Обзор 2026 года описывает перспективы таких систем для бесконтактного анализа клеток и разработки компактных диагностических платформ [3].

Использование голографии в медицине и биологических исследованиях

Одной из наиболее перспективных областей применения голографии является биомедицинская визуализация. Традиционная микроскопия часто требует специальной подготовки образца, окрашивания или применения контрастирующих веществ. Цифровая голографическая микроскопия позволяет получать информацию о клеточных структурах без обязательного использования таких процедур.

Особую ценность представляет возможность количественного анализа оптической фазы. Изменения фазы световой волны связаны с особенностями прохождения излучения через исследуемый объект, включая его толщину и оптические свойства. Это позволяет оценивать морфологию клеток, отслеживать изменения их формы и исследовать динамические процессы.

Голографическая микроскопия может использоваться при изучении клеток крови, микроорганизмов, клеточных культур и других биологических объектов. Она позволяет наблюдать движение клеток в пространстве, оценивать их размеры и анализировать изменения во времени. В исследовании 2024 года по цифровой внеосевой голографической микроскопии рассмотрены методы идентификации и отслеживания биологических клеток без применения традиционного окрашивания [4].

Перспективным направлением является создание компактных безлинзовых микроскопов. Такие системы используют цифровые сенсоры и вычислительное восстановление изображения, что потенциально позволяет уменьшить размеры и стоимость оборудования. Обзор клинических и биомедицинских применений безлинзовой голографической микроскопии, опубликованный в 2024 году, рассматривает возможности её использования в лабораторной диагностике и исследованиях в условиях ограниченной инфраструктуры [5].

При этом голографическая микроскопия не является универсальной заменой традиционным методам. Её результаты зависят от качества реконструкции, характеристик образца и условий регистрации. Для клинического применения

необходимы стандартизированные процедуры, проверка точности измерений и сопоставление результатов с признанными диагностическими методами.

Голография в промышленности, метрологии и материаловедении

В промышленности голографические методы применяются для бесконтактного контроля формы и состояния объектов. Они позволяют исследовать поверхности, выявлять деформации и оценивать изменения конструкции под действием нагрузки, температуры или вибрации.

Особое значение имеет голографическая интерферометрия. В этом методе сравниваются волновые поля, полученные от объекта в разных состояниях. Изменения интерференционной картины позволяют обнаруживать малые смещения и деформации, которые трудно выявить обычными измерительными средствами.

Метод может использоваться при исследовании авиационных конструкций, деталей машин, композитных материалов, элементов турбин и других технических объектов. Например, при испытании металлической детали под нагрузкой можно зарегистрировать её состояние до и после воздействия. Сопоставление двух голографических записей позволяет выявить участки, в которых происходят наиболее заметные изменения.

В материаловедении голографические методы применяются для исследования неоднородностей, микродефектов и особенностей оптических свойств прозрачных сред. Цифровая обработка позволяет получать количественные данные о фазовых изменениях и использовать их для построения карт распределения исследуемых параметров. Современные обзоры подчёркивают значение голографии для точных измерений и анализа физических характеристик объектов [6; 8].

Голографические изображения в образовании, культуре и информационной безопасности

В образовательной сфере голографические технологии могут использоваться для наглядного представления сложных пространственных объектов. Студенты получают возможность изучать строение механизмов, анатомические модели, геометрические фигуры и архитектурные конструкции с разных точек наблюдения. Такой подход особенно полезен в дисциплинах, где понимание пространственных взаимосвязей играет важную роль.

В музейной и культурной деятельности голограммы применяются для демонстрации копий исторических предметов, археологических находок и произведений искусства. Они позволяют представить объекты в объёмной форме, не подвергая оригиналы дополнительному воздействию. Однако такие изображения следует рассматривать как средства визуализации, а не как полноценную замену подлинным экспонатам.

Значительное практическое применение получили защитные голографические элементы. Они используются на документах, упаковке продукции, банковских картах и маркировке товаров. Сложная микроструктура голограммы затрудняет её воспроизведение обычными средствами печати. Дополнительную защиту обеспечивают скрытые изображения, микротексты, кинематические эффекты и специальные оптические признаки.

Заключение

Голография представляет собой важное направление современной оптики, позволяющее регистрировать и восстанавливать информацию о световом волновом поле. Её развитие прошло путь от фундаментальной физической идеи до широкого комплекса аналоговых и цифровых технологий, применяемых в научных исследованиях и промышленности.

Особое значение приобрела цифровая голография, которая объединила оптическую регистрацию с вычислительной реконструкцией. Благодаря этому стало возможным не только получать пространственные изображения, но и выполнять количественные измерения, исследовать биологические объекты и анализировать малые деформации материалов.

Вместе с тем существующие системы имеют ограничения, связанные с разрешением, углом обзора, вычислительной сложностью и стоимостью оборудования. Их преодоление требует дальнейшего развития фотоники, оптических материалов, сенсорных технологий и алгоритмов обработки информации.

Список литературы

1. Gabor D. *Microscopy by Reconstructed Wave-Fronts*. Proceedings of the Royal Society A, 1949. Основополагающая работа по принципам голографии. Нобелевская лекция Денниса Габора.
2. Huang Z., Cao L. Quantitative phase imaging based on holography: trends and new perspectives. *Light: Science & Applications*, 2024, Vol. 13, Article 145. Научная публикация.
3. AI-driven digital holographic microscopy for label-free quantitative cellular analysis: toward low-cost and field-deployable platforms. *Biomedical Optics Express*, 2026, Vol. 17, No. 5, pp. 2349–2370. Научная публикация.
4. Kim J., Lee S. J. Digital in-line holographic microscopy for label-free identification and tracking of biological cells. *Military Medical Research*, 2024, Vol. 11, Article 38. Научная публикация.
5. Clinical and Biomedical Applications of Lensless Holographic Microscopy. *Laser & Photonics Reviews*, 2024. Научный обзор.
6. Tahara T., Shimobaba T., Kozawa Y. Review on imaging and sensing with holography. *Journal of Optics*, 2025, Vol. 27, 043005. Научный обзор.