

УДК 004.023

Е. В. Беляк

Институт проблем регистрации информации НАН Украины
ул. Н. Шпака 2, 03113 Киев, Украина

Проблемы и пути создания объемных оптических голографических носителей информации

Рассмотрены физико-технические основы создания объемных оптических носителей. Проанализированы технические возможности создания голографических носителей. Определены проблемы, от решения которых зависит создание объемных носителей информации.

Ключевые слова: голографический носитель, плотность записи информации, скорость считывания и записи информации, дифракционная эффективность, фотополимер, среды с электронным захватом, перезаписываемые носители информации.

Введение

Плотность записи информации на оптических дисках уже вплотную приблизилась к значениям, определяемым дифракционным пределом. Минимальный диаметр сфокусированного пятна на уровне полуширины определяется выражением $\sim \lambda / 2 \cdot n \sin \Theta$. При длине волны $\lambda = 400$ нм и числовой апертуре $n \sin \Theta = 0,9$ плотность записи на носителе может быть около 10^8 бит/см² [1].

Увеличение плотности записи в несколько раз на оптических дисках может быть достигнуто за счет применения ближнеполевых [2, 3] или иммерсионных [4, 5] методов записи, а также их комбинированного использования. Однако применение этих методов записи приводит к потере ряда преимуществ оптических носителей, а именно бесконтактности способа регистрации (при ближнеполевых и иммерсионных методах — расстояние между фокусирующей системой и носителем составляет несколько десятков нанометров), возможности работы с носителями без соблюдения условий электровакуумной гигиены. Возможности оптических систем регистрации позволяют достичь существенного увеличения емкости оптических носителей не только за счет уменьшения диаметра лазерного пятна, сфокусированного на поверхность носителя, но и за счет записи информации в объеме носителя. В настоящее время развивается два технических направления, реализующих эту идею, а именно создание многослойных носителей информации и голографических объемных носителей. Основным преимуществом многослойных носителей является сохране-

© Е. В. Беляк

ние формы представления информации, принятой на стандартных компакт-дисках (CD, DVD), при существенном увеличении общей емкости носителя (количество слоев в носителях с люминесцентным считыванием может быть более 100 [6]). Необходимо отметить технологическую сложность изготовления многослойных оптических носителей, а также проблему низкой скорости записи и считывания информации с такого носителя. При голографическом методе регистрации информации запись в объеме реализуется технологически проще, а за счет параллельного ввода информации по большому числу каналов и многоканального считывания информации, скорости записи и считывания информации могут быть на несколько порядков выше, чем в случае многослойной записи.

Физико-технические основы создания голографических носителей информации

По одной из классификаций [7, 10] голограммы можно разделить на линейные, двухмерные и трехмерные, причем последние представляют собой многослойный набор двухмерных голограмм. В каждом слое трехмерной голограммы происходит усиление света на той длине волны, где разность фаз от плоских голограмм соседних слоев равна 2π . Трехмерные голограммы более предпочтительны для записи оптической информации, т.к. обеспечивают значительно большую дифракционную эффективность, чем двухмерные. На их основе возможно применение методов уплотнения информации, что исключено в случае применения двухмерных голограмм. С другой стороны, создание носителя на основе двухмерной голограммы значительно снижает требования к выбору материала, а использование модуляции рельефа поверхности двухмерных голограмм позволяет также добиться достаточно больших значений дифракционной эффективности [8–10]. Кроме этого, лишь применение двухмерных или же линейных голограмм позволяет осуществить многослойную голографическую запись информации [11, 17].

Подобно оптическим дискам (CD и DVD) голографические носители могут быть:

- типа ROM (постоянная запись — многократные воспроизведения);
- с однократной записью и многократным считыванием;
- перезаписываемыми носителями.

Наиболее простой является реализация голографических носителей типа ROM. При создании таких носителей требования к выбору материала не столь жесткие, как в двух других случаях, и весь объем информации можно записать одним блоком (соответственно одной голограммой). Кроме того, в случае записи носителей типа ROM появляется возможность применить ряд весьма эффективных технологических решений, связанных с дополнительной обработкой носителя после записи на него информации и направленных на увеличение срока хранения записанной информации, что, разумеется, невозможно при создании носителей с однократной записью и перезаписываемых носителей. Однако подход, изначально исключающий возможность создания носителей информации с однократной записью и перезаписываемых носителей, на сегодняшний день не может считаться удовлетворительным, и это вынуждает исследователей к поиску альтернативных методов голографической записи.

Носители с однократной записью и многократным считыванием реализовать значительно сложнее, особенно тогда, когда нужно записывать информацию на такой носитель отдельными блоками. В этом случае появляется необходимость локальной записи информации, в виде набора микроголограмм, таким образом, структура голографического носителя с однократной записью и многократным считыванием должна соответствовать структуре оптических дисков CD и DVD. Питам стандартных оптических дисков тут соответствуют микроголограммы, которые несут небольшие блоки информации.

Перезаписываемые голографические носители также должны включать в свою структуру набор микроголограмм, но в данном случае, кроме локальной записи тут также появляется необходимость локального стирания информации. При разработке носителей такого типа в качестве основы зачастую берутся методы, которые применяются при создании голографических энергозависимых запоминающих устройств. В дальнейшем за счет некоторого варьирования материала и технологии записи добиваются устойчивого воспроизведения информации через большие промежутки времени, в течение которых к носителю не применяются дополнительные меры по поддержанию записанного сигнала на прежнем уровне (как, например, ультрафиолетовая подсветка).

Несмотря на то, что голографическая запись информации как один из методов оптической записи уже несет в себе возможность значительного увеличения плотности записи, ряд исследований в этой области направлен на изучение возможностей дополнительного увеличения плотности записи информации. В голографической записи такие возможности связаны, прежде всего, с различными методами уплотнения записи информации:

- по длине волны [12, 13, 17, 18];
- по углу между плоскостью носителя и записывающим лучом [12, 14, 15, 18];
- перистрофическое (уплотнение за счет вращения носителя вдоль оси, перпендикулярной плоскости носителя) [12, 16];
- по фазе записывающего сигнала [12, 18].

Методы уплотнения дают возможность записывать несколько голограмм на одном участке носителя и таким образом в несколько раз увеличивать плотность записи информации без заметного ухудшения качества записи. Как показано в ряде работ [12, 14, 16] существует возможность комбинирования данных методов, что позволяет в еще большей мере увеличить плотность записи информации. Но при этом, разумеется, значительно усложняются конструкции записывающего и считывающего устройств.

Еще одним методом повышения плотности голографической записи является запись информации с разными градациями яркости [13]. Однако ее эффективное применение возможно лишь в том случае, когда структура голографического диска представляет большой набор микроголограмм. В случае записи всей информации в виде одной голограммы количество дополнительной информации, которую позволит записать такой метод, крайне незначительно.

Выбор материала информационного слоя голографического носителя информации

К материалу информационного слоя голографического носителя информации существует ряд требований, выполнение которых является в той или иной степени важным для реализации соответствующей концепции:

- высокое пространственное разрешение и, соответственно, беззернистая (весьма мелкозернистая, с зёрнами субмикронных размеров) структура;
- высокая фоточувствительность (запись на уровне 10 мДж/см² и ниже);
- длительный срок хранения носителя после записи на него информации (десятки лет);
- длительный срок хранения носителя до записи на него информации (годы);
- возможность сухой записи;
- возможность записи за короткий промежуток времени (2 мкс и меньше);
- возможность локального стирания информации неограниченное число раз;
- широкая полоса записи в диапазоне от инфракрасного до ультрафиолетового света;
- нечувствительность к внешнему излучению после записи;
- низкая себестоимость.

Обзор ряда работ по голографической записи информации [8, 12, 21–24] даёт основания полагать, что наиболее перспективными материалами в данной области являются фотополимеры. Они удобны своей доступностью, дешёвизной, широким выбором составных компонентов, варьирование которыми позволяет практически неограниченно изменять свойства данного материала. Характерным является то, что данный класс материалов также активно используется при создании прототипов другого типа объёмной оптической памяти — многослойных оптических носителей информации.

Наиболее типичными компонентами фотополимера, представляющего собой основу голографического носителя, являются:

- раствор полимера (обычно на основе акрила);
- краситель (в большинстве случаев метилен);
- связующее вещество.

Для фиксации информационного слоя используется облучение носителя ультрафиолетовым излучением, например, светом ксеноновой лампы. В некоторых случаях [12] предлагается также дополнительная термическая обработка носителя после записи информации. Это связано с тем, что как показали эксперименты, при записи микроголограмм в фотополимере наблюдается эффект сжатия голограммы после записи. Такой эффект приводит к смещению длины волны, необходимой для воспроизведения голограммы, в фиолетовую область спектра. Соответственно при считывании несоблюдение условия Брэгга приводит к значительному (вплоть до двух порядков) уменьшению значения дифракционной эффективности. Термическая же обработка образца за счёт конвекции воздуха, нагретого до температуры 150 °С, позволяет компенсировать фиолетовое смещение спектра, причем эффект компенсации сохраняется и после охлаждения образца до нормальной температуры. К сожалению, метод термообработки носителя после записи информа-

ции несовместим с концепцией создания носителей с однократной записью и многократным считыванием и перезаписываемых носителей.

Термическая обработка носителя может применяться и до записи на него информации. Этот процесс необходим для испарения катализатора, который часто является летучим и ядовитым веществом [8, 22, 23].

Эффект сжатия, проявляющийся практически во всех случаях голографической записи в фотополимере, является не единственным недостатком данного столь перспективного класса материалов. В ходе исследований в качестве основных были выявлены следующие проблемы:

- высокий уровень флуктуации сигнала при записи и соответственно низкое значение отношения сигнал/шум при считывании информации (вплоть до 2:1);
- малое время хранения носителя до записи (зачастую в пределах от недели до месяца);
- невозпроизводимость записанной информации по истечении длительного промежутка времени.

Голографический носитель, созданный на основе указанных выше компонентов (раствор полимера на основе акрила, краситель метилен и связующее вещество), обычно несет в себе все перечисленные недостатки [8, 19, 20]. Однако добавка в смесь дополнительных компонентов позволяет значительно улучшить показатели. Так, добавка акриламида [25] ускоряет процесс полимеризации. Полученный в результате сополимер обладает в 5 раз большей чувствительностью, чем исходный полимер (запись на уровне 5 мДж см²). Однако, вследствие того, что акриламид не образует связей с фоточувствительным материалом, время хранения записанных голограмм является неудовлетворительно малым (1–2 недели). Добавка же акриламида с восстановителями, такими как ацетилацетон и триэтиноламин [26], позволяет нивелировать эти недостатки, а также значительно увеличивает время хранения носителя до записи, но, к сожалению, почти на порядок уменьшает фоточувствительность регистрирующей среды. В качестве стабильной регистрирующей среды также хорошо себя показали полимеры, где в качестве фоточувствительного элемента применялся метилен синий [8, 9]. Но в этом случае неудовлетворительным было значение дифракционной эффективности — 0,5 %.

Высоким значением дифракционной эффективности (70 %) обладают пленки полиметилметакрилата [30]. При добавке сенсабилизатора *p*-бензохинон [31] у пленок значительно возрастает фоточувствительность в видимом диапазоне, однако увеличивается уровень флуктуации сигнала.

Столь же высокие показатели дифракционной эффективности при лучшей стабильности записи показывают фотополимеры на основе огнеупорных полимеров с добавками α -дикетонов бензила и хинона камфары [32, 33], однако, в данном случае, недостатком является низкая фоточувствительность (запись на уровне 50 мДж/см²) и, соответственно, необходимость использования для записи мощной лазерной установки.

Очень эффективным методом предварительной обработки голографического носителя информации на основе фотополимера, позволяющей существенно увеличить такие параметры как пространственное разрешение, дифракционная эффективность (до 90 %) и получить возможность записи трехмерных голограмм,

является обработка образца под высоким давлением в кислородной камере [34]. Как показали исследования, проникновение кислорода в полимер весьма велико, и лишь несколько дней уходит на насыщение кислородом образца толщиной в 1 мм. В процессе записи происходит передача энергии от молекул красителя, находящихся в возбужденном состоянии, молекулам кислорода, что разбивает последние на атомы. А одиночные атомы кислорода являются очень активными окислителями и, соответственно, в облученных участках образуется фотооксид, который обладает высокой фоточувствительностью во всем видимом диапазоне. После химической фотореакции, в результате которой происходит запись информации, свободные атомы кислорода покидают материал в результате естественной диффузии, и носитель теряет фоточувствительность в видимом диапазоне.

Во всех рассмотренных выше случаях в фотополимерах в качестве фоточувствительного вещества использовался метилен. Удачной альтернативой метилену является фотохром [35]. В случае использования фотохрома появляется возможность создания на основе фотополимера перезаписываемого голографического носителя, т.к. процесс записи в такой среде соответствует процессу электронного захвата. Кроме того, во всех фотополимерах, где фотохром использовался в качестве фоточувствительного вещества, наблюдались очень высокие, более 80 %, значения дифракционной эффективности. Недостатком использования фотохрома является его низкая фоточувствительность, в данном случае запись возможна лишь на уровне, большем 50 мДж/см².

На основе кристаллов LiNbO₃ также возможно создание сред с электронным захватом и, соответственно, перезаписываемых голографических носителей [11, 36]. Легирование кристаллов LiNbO₃ марганцем или железом дает возможность получить в такой среде стабильную запись без дополнительной ультрафиолетовой подсветки, лишь считывание частично стирает записанную информацию, что неизбежно при записи в средах с электронным захватом. Тем не менее, технологические сложности по выращиванию кристаллов LiNbO₃ обуславливают дороговизну таких носителей.

Кроме того, у исследователей вызывает определенный интерес использование в качестве регистрирующих сред голографических носителей фотографических пленок и фотографических пластинок [13], которые позволяют записывать трехмерные голограммы. В этой области, в первую очередь, ведется поиск мелкодисперсных сред. Однако процесс записи информации на такие носители не может быть сухим и чистым, что является существенным недостатком.

Анализ организации процесса записи/воспроизведения информации с голографических носителей

Для построения голографических ЗУ было предложено большое число различных схем [19–22], в том числе реализующих алгоритмы ассоциативного поиска информации [18, 20] и кодирование информации опорным лучом. На сегодняшний день наиболее близки к технической реализации голографические дисковые запоминающие устройства. Информация на голографическом диске может быть представлена в виде:

— одной голограммы, занимающей всю площадь поверхности голографического диска, или нескольких голограмм эквивалентной площади, записанных с применением методов уплотнения;

— набора микроголограмм, записанных на поверхности диска по спирали или в виде концентрических колец, в том числе с наложением между собой с применением методов уплотнения;

— многослойного набора голограмм, записанных без наложения между собой.

В случае записи информации в виде одной голограммы, занимающей всю площадь поверхности носителя, надежность хранения информации значительно больше, чем в других методах голографической записи. Каждый элемент информации записывается на всей площади голограммы, а значит чувствительность носителя к помехам импульсного характера, таким как пыль царапины и др. будет минимальна, т.к. последние не могут занимать площадь, соответствующую площади носителя. Для записи таких голограмм должна применяться большая матрица источников излучения, и в качестве технологического решения было предложено облучение голограммы светом, который проходит через электрически управляемый транспарант. В роли последнего может выступать транспарант на основе жидких кристаллов или же транспарант на ортоферрите, где под действием магнитного поля, создаваемого электрическими импульсами, протекающими в проводниках, определенные ячейки ортоферрита перемагничиваются и дают возможность под поляризованным светом получить контрастное двумерное изображение. Считывание же в данном случае производится большой матрицей фотодиодов. К недостаткам такого технологического решения можно отнести сложность устройства записи и считывания, невозможность реализовать на его основе мультисессионные носители с однократной записью и перезаписываемые носители, т.к. вся информация записывается одним блоком или несколькими большими блоками (в случае применения методов уплотнения). Большим достоинством являются чрезвычайно высокие скорости записи и считывания информации, которые за счет применения тут в полной мере метода многоканальной записи и считывания, могут превосходить аналогичные показатели для других оптических носителей информации на много порядков.

Представление информации на диске в виде набора микроголограмм, записанных на его поверхности по спирали или в виде концентрических колец, позволяет создавать мультисессионные диски с однократной записью. При использовании в качестве материала основы сред с электронным захватом или же других сред с возможностью локального стирания такое представление информации позволяет также создавать перезаписываемые диски. Однако последнее исключает возможность наложения голограмм, и, соответственно, ограничивает общую информационную емкость носителя. На рис. 1 в общем виде показана схема параллельной записи и считывания сигналов по многим каналам с такого носителя [10]. Луч лазера делится на два луча — опорный и сигнальный. Последний, в свою очередь, делится на n каналов, по числу одновременно записываемых двоичных сигналов. Далее модуляторы пропускают лазерные лучи при наличии управляющего напряжения, при его же отсутствии они будут непрозрачными, формируя, таким образом, полезный сигнал в матричном виде. Следующая комбинация лучей записывается на соседний участок голограммы, который смещается на соответствующее расстояние. При считывании информации опорный луч проходит через оптоэлектронную систему управления

(ОСУ) и, просвечивая голограмму, проецирует изображение на систему фотоприемников Φ . Принципы построения таких устройств позволяют получать на одном диске диаметром 120 мм емкость информации до нескольких терабит (плотность > 100 Гбит/дм²) и скорость воспроизведения до 32 Гбайт/с [21]. В большинстве дисковых голографических ЗУ используется запись линейных голограмм, при которой применяются стоканальные пространственные модуляторы света. Использование одномерных голограмм, расположенных перпендикулярно движению носителя, но так, чтобы интерференционные полосы шли вдоль направления движения, необходимо в том случае, когда голограмма записывается за достаточно большой промежуток времени по отношению к скорости вращения диска. Это позволяет избежать искажения записанной информации, которое могло появиться вследствие эффекта «размазывания». Для снижения требований к точности работы систем автоматической фокусировки и автотрекинга, а также повышения устойчивости записи к повреждениям и дефектам носителя, предлагается записывать информацию в виде двухмерных голограмм [21]. При такой организации процесса записи происходит многократное (до 30 раз) наложение микроголограмм, записанных при использовании методов уплотнения информации и, как и в предыдущем случае, расположенных на поверхности диска в виде спирали или концентрических колец.

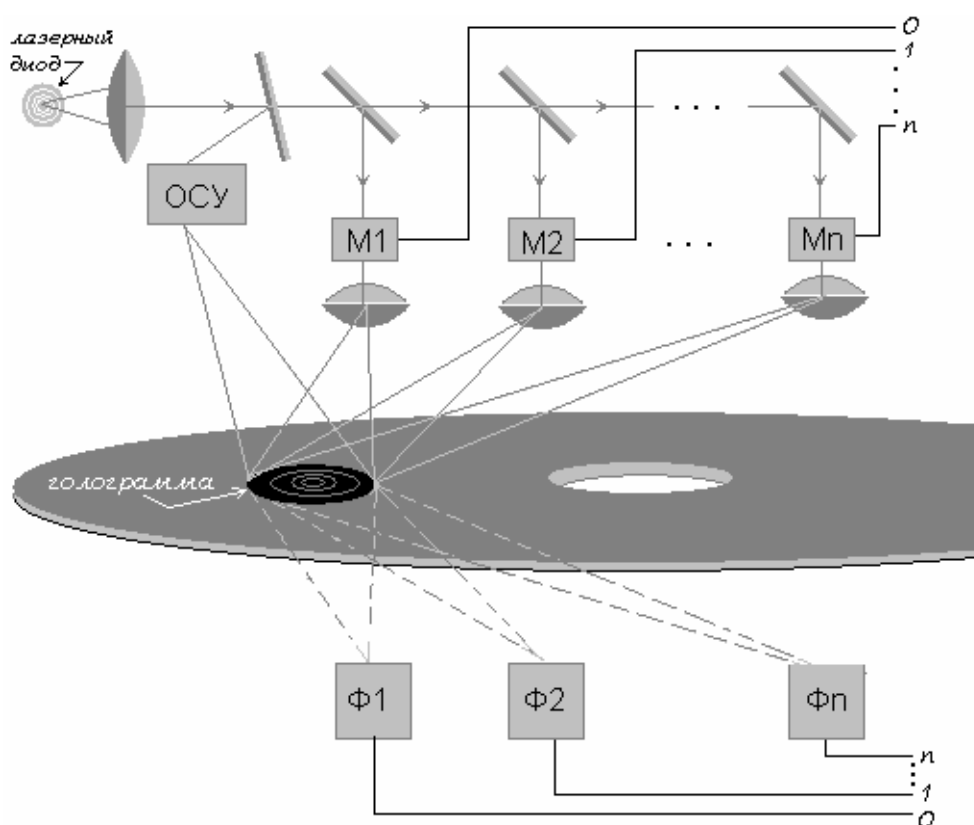


Рис. 1. Схема параллельной записи и считывания сигналов по многим каналам с голографического диска

Создание перезаписываемых носителей информации большой емкости возможно при использовании концепции многослойной записи без взаимного наложения голограмм. На сегодняшний день концепция многослойной голографической записи была воплощена для носителей на основе кристаллов LiNbO_3 , легированных оксидами марганца и железа, а также других кристаллов, являющихся средами с электронным захватом [37, 38]. На основе данных кристаллов удалось реализовать перезаписываемый голографический носитель с 50-слойной структурой. Запись производилась гелий-неоновым лазером, мощность опорного луча составляла 720 мкВт, мощность сигнального луча — 120 мкВт. Записываемый участок подвергался предварительному облучению ультрафиолетовым светом в течение 10 с. Стирание и считывание записанной информации производилось одним лучом гелий-неонового лазера. Время стирания информации, представленной в виде локальной голограммы, оказалось в три раза большим времени ее записи. Очевидно, что недостатком технологии в данном случае является очень низкая скорость записи и стирания информации, а также то, что записанная информация частично стирается при считывании.

Так как выращивание крупных кристаллов заданной формы является чрезвычайно сложным технологическим процессом, было предложено организовать структуру информационного слоя подобно структуре оптоволокна [42], в виде набора кристаллов цилиндрической формы с диаметром основания равным 1 мм и высотой 5 мм (рис. 2). Данный подход позволяет значительно уменьшить себестоимость перезаписываемого голографического носителя, а также снижает уровень перекрестных помех, возникающих при записи и считывании информации с такого носителя.

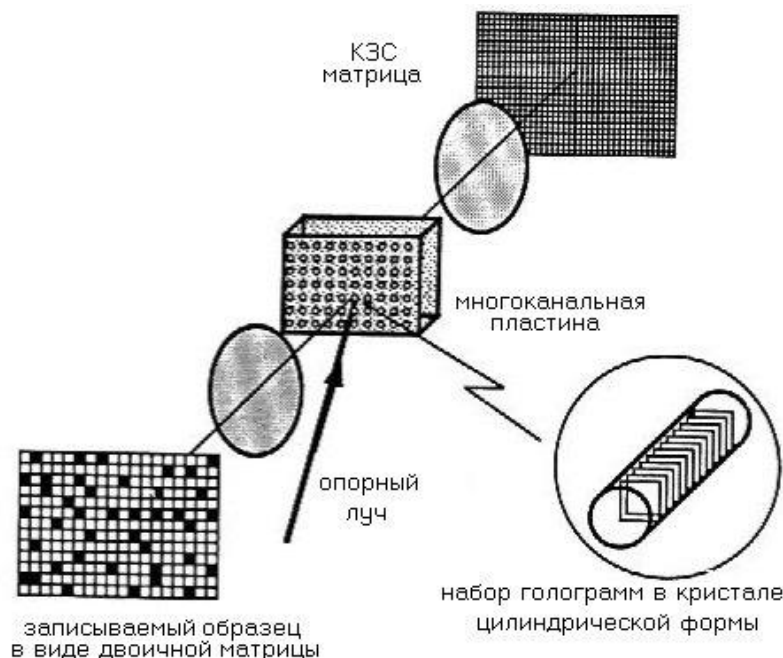


Рис. 2. Запись и считывание информации с голографического носителя, представленного в виде многоканальной пластины

Использование голографических носителей в нейросетевых архитектурах

Одной из наиболее интересных возможностей применения голографических носителей информации является применение их в нейросетевых архитектурах. Организация процесса поиска информации, подобно процессам, происходящим в нейронных сетях живых организмов, позволит значительно увеличить эффективность работы с большими объемами слабо формализованной информации. Использование голографических носителей с ассоциативной организацией поиска информации дает возможность создания искусственной нейронной сети.

При обычной организации ЗУ обращение происходит только адресным способом, т.е. поиск нужной информации происходит путем последовательного анализа содержимого всех ячеек памяти. В случае же ассоциативной организации памяти обращение осуществляется сразу по всем данным, хранящимся в памяти по определенному формальному признаку. В результате из банка данных большого объема извлекается нужная информация за один период обращения.

Обобщенная схема ассоциативного ЗУ [10] представлена на рис. 3. Входное изображение в виде фрагмента массива данных, подлежащих извлечению из памяти, является считывающим оптическим сигналом, падающим на голограмму Г₁, в которой содержатся информационные массивы, записанные под разным углом падения опорного луча. В результате считывания восстанавливаются все исходные опорные лучи, но интенсивность каждого из них будет пропорциональна функции взаимной корреляции между фрагментами данных и тем информационным массивом, который был записан с данным опорным лучом. Поэтому интенсивность опорного луча, которым был записан нужный массив данных, будет превышать интенсивности других опорных лучей.

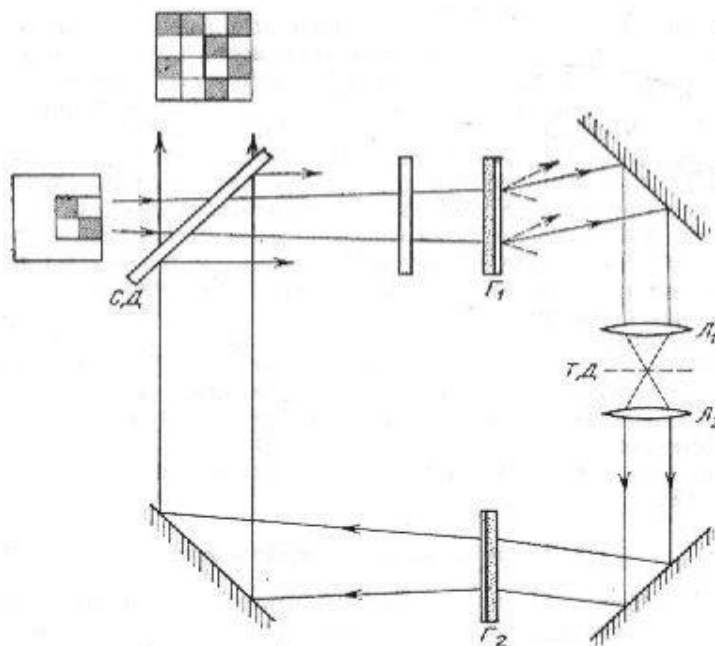


Рис. 3. Схема ассоциативного голографического ЗУ

Пространственный спектр восстановленных опорных лучей фильтруется с помощью маски точечных диафрагм ТД, расположенных между линзами Л1 и Л2, что еще в большей степени увеличивает разницу в интенсивностях основного опорного луча и остальных. Поэтому, в тот момент, когда опорные лучи падают на голограмму Г2, идентичную голограмме Г1, восстанавливается в первую очередь искомый массив, остальные же массивы восстанавливаются значительно слабее и создают шумовой фон. Для подавления этого фона можно при помощи светоделителя СД реализовать многократный проход сигналов по замкнутой цепи. В таком случае можно также обойтись без второй голограммы Г2. Время выборки информации из голографического ассоциативного ЗУ определяется временем формирования фрагмента и может составлять величину, соответствующую 10^{-4} с. В случае работы с большими массивами данных это обеспечит чрезвычайно большие скорости работы ЗУ в режиме поиска.

Ряд работ [38–41] указывает на возможность реализации нейросетевой парадигмы на основе ассоциативных голографических ЗУ. В большинстве случаев предлагается создание искусственной нейронной сети с прямой трехслойной структурой памяти (рис. 4), где в качестве первого и третьего слоев используются идентичные массивы голограмм, а второго (скрытого) слоя — сеть WTA (Winner Take All), осуществляющая отбор информации по принципу наибольшего подобия. Выборка нужного массива происходит при взаимодействии первого и второго слоя сети, что отображается на графе как W_{ij} . На рис. 5 представлена схема фотозлектронной сети WTA. Элементы сети, нейроны, включают в себя фотодиоды и светодиоды для преобразования светового сигнала в электрический и электрического в световой. Сеть WTA представляет собой многоканальный компаратор, который выделяет из множества сигналов один сигнал с наибольшей интенсивностью. Каждый нейрон второго слоя D_j соответствует одной из голограмм массива. После определенного количества итераций лишь один нейрон с максимальным входным значением, соответствующим максимальному подобию, дает ненулевое выходное значение сигнала. Взаимодействие между сетью WTA и третьим слоем (W'_{jk}) преобразует сигнал в искомый массив информации на выходе. Такое преобразование может осуществляться как по автоассоциативному (если $W_{ij} = W'_{jk}$), так и по гетероассоциативному (если $W_{ij} \neq W'_{jk}$) принципу. В качестве примера автоассоциативного поиска информации обычно приводится поиск графического изображения по его фрагменту, а гетероассоциативного — поиск текста, соответствующего графическому изображению по фрагменту данного изображения.

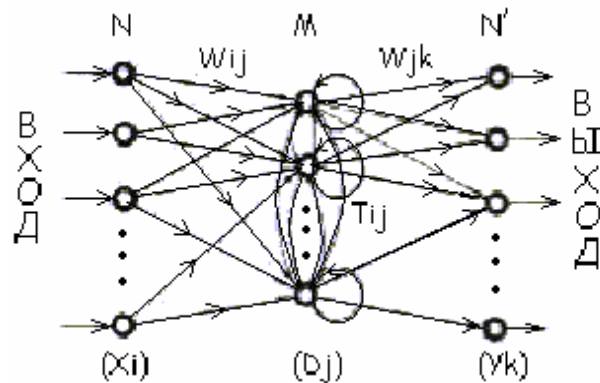


Рис. 4. Нейросетевая архитектура с прямой трехслойной структурой памяти

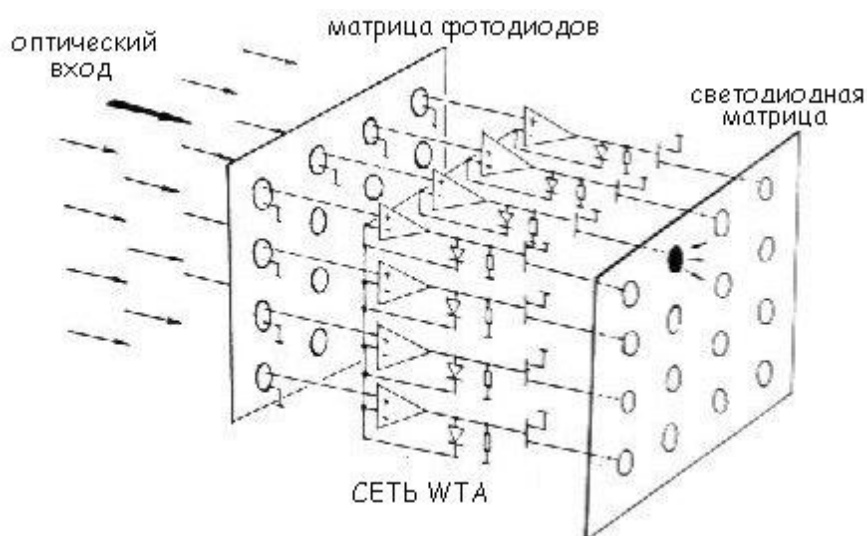


Рис. 5. Схема фотоэлектронной сети WTA

Как показывают эксперименты, нейросетевая архитектура на основе голографических носителей позволяет организовать эффективную выборку данных из больших информационных массивов по ассоциативному принципу, в том числе и при наличии искажений информации во входном фрагменте, по которому производится выборка.

Ближайшие перспективы развития технологии объемной оптической записи

В начале 2003 г. корпорацией Aprilis был представлен прототип голографического диска типа ROM [15]. В качестве материала основы использовался фотополимерный комплекс. Данный материал обеспечил высокую контрастность записи и надежное хранение информации. Наиболее важным оказалось то, что данный фотополимерный комплекс позволил без дополнительной обработки образца обойти характерный для голографической записи в фотополимерах эффект сжатия, значительно уменьшающий значения дифракционной эффективности. Диск, по размерам соответствующий стандартным компакт-дискам CD, может нести до 200 Гб информации, скорость считывания при этом равна 1 Гбит/с. Организация информационной структуры диска реализует алгоритмы ассоциативного поиска информации. Себестоимость таких носителей информации при их массовом производстве будет приблизительно равна себестоимости компакт-дисков. Аналогичные данные приводятся и относительно второго поколения устройств считывания информации с таких носителей (прототипы которых будут опробованы в конце этого года), и ряд корпораций Южной Кореи и Японии уже заинтересовались данной технологией. Голографические диски Aprilis призваны заменить, в первую очередь, формат DVD дисков, предоставляя возможность записывать цифровую и аналоговую видеоинформацию в лучшем разрешении, с лучшей цветопередачей и без использования алгоритмов сжатия. В сфере хранения компьютерной информации такие диски, особенно с учетом высоких скоростей передачи

данных, могли бы заменить не только сменные носители CD и DVD, но также и накопители на жестких дисках, при условии создания перезаписываемых дисков Aprilis.

Выводы

1. Разработанные в результате многолетних исследований эффективные системы записи и считывания информации на объемные голографические носители на основе фотополимерных материалов позволят в ближайшее время создать голографические носители информации с емкостью до десяти терабайт на одном диске.

2. Наиболее эффективным методом организации на голографическом диске является организация информации в виде набора микроголограмм, записанных на поверхности диска по спирали или в виде концентрических колец, с наложением между собой за счет методов уплотнения.

3. Нейросетевая архитектура на основе голографических носителей позволяет организовать чрезвычайно эффективную выборку данных из больших неупорядоченных информационных массивов по ассоциативному принципу.

1. *Петров В.В., Токар О.П.* Про щільність запису інформації в оптичних ЗП / Доп. АН УРСР. — 1973. — № 9.

2. *Kimihiro Saito, Koichiro Kishima and Isao Ichimura.* Readout Signals Calculated for Near-Field Optical Pickups with Land and Groove Recording // *Appl. Opt.* — 2000. — Vol. 39. — P. 4153–4155.

3. *Shen Y., Swiatkiewicz J., Jakubczyk D.* High-density Optical Data Storage with One-Photon and Two-Photon Near-Field Fluorescence Microscopy // *Appl. Opt.* — 2001. — Vol. 40, N 6. — P. 938–940.

4. *Ichimuru I., Hayashi S., Kino G.S.* High-density optical recording using a solid immersion lens // *Appl. Opt.* — 1997. — Vol. 36. — P. 4339–4348.

5. Пат. 6039898 США. МКИ В29Д 011/00. Optical Memory Device and a Method for Manufacturing Thereof / Glushko Boris (Ashdod, IL); O.M.D. Optical Memory Device, Ltd. — № 956052: Заявл. 22.10.1997; Опубл. 21.03.2000; НКИ 264/1.33.

6. Применение методов оптической обработки информации и голографии // Гуричев С.Б., Соколова В.К. — Ленинград: ЛИЯФ, 1980. — 442 с.

7. *Jenney J.A.* Holographic Recording with Photopolymers // *J. Opt. Soc. Am.* — 1970. — **60**, N 1155. — P. 1155–1215.

8. *Sadlej N. and Smolinska B.* Sensitive Polymer Layers for Holography // *Opt. Laser Technol.* — 1974. — **7**, N 175. — P. 175–182.

9. *Микаэлян А.Л.* Оптические методы в информатике — М.: Наука, 1990. — 232 с.

10. *Christophe Moser, Benjamin Schupp and Demetri Psaltis.* Localized Holographic Recording in Doubly Doped Lithium Niobate // *Optics Letters.* — 2000. — Vol. 25, N 3. — P. 162–164.

11. *Eichler H.J., Kuemmel P., Orlic S., Schupp B., Wappelt A.* Wavelength Multiplexing for the Microholographic Storage Disc // *SPIE.* — 1998. — Vol. 3401. — P. 177–184.

12. *Tsvetov E.R., Matevosov.* Design of Holographic Memory System with High Data Storage Capacity // *SPIE.* — 1994. — Vol. 2429 (Optical Memory). — P. 179–186.

13. *F. Mok M.* Angle-Multiplexed Storage of 5000 in LiNbO₃ // *Opt. Lett.* — 1993. — Vol. 18, N 11. — P. 915–917.

14. *Marc Hachman Aprilis*. Unveils Holographic Disc Media // *Extreme Tech*. — 2003. — N 2. — P. 1–6.
15. *Allen Pu*. Holographic Storage in thin Films Using Peristrophic Multiplexing // *SPIE Holography*. — 1994. — Vol. 4, N 2. — P. 1–2.
16. Пат. 6621633 США. МКИ G02B 027/00. System and Method for Increasing the Diffraction Efficiency of Holograms / *Barbastathis; George* (Boston, MA); *Sinha; Arnab* (Cambridge, MA), Massachusetts Institute of Technology (Cambridge, MA) — № 938249; Заявл. 23.08.2001; Опубл. 16.09.2003; НКИ 359/577.
17. *Yi-mo Zhang, Wang Fan*. A New Real-Time Associative Memory System // *SPIE*. — 1992. — Vol. 1731. — P. 65–73.
18. *Lamberg Hesselink, Jeff Wilde*. Recent Advances in Holographic Data Storage in SBN // *SPIE*. — 1991. — Vol. 1731. — P. 74–79.
19. *Odinkov S.B., Petrov A.V., Spiridonov I.V.* Compact Holographic ROM with Digital Information Storage Medium Based on Plastic Card // *SPIE*. — 1994. — Vol. 2429 (Optical Memory). — P. 50–54.
20. *Bloom A., Bartolini R.A. and Ross D.L.* Organic Recording Medium for Volume Phase Holography // *Appl. Phys. Lett.* — 1974. — N 24. — P. 612.
21. *Jenney J.A.* Fixing of Photopolymer Holograms // *J. Opt. Soc. Am.* — 1971. — N 61. — P. 1116.
22. *Jenney J.A.* Nonlinearities of Photopolymer Holographic Recording Materials // *Appl. Opt.* — 1972. — N 11. — P. 1371.
23. *R.L. Van Renesse*. Photopolymers in Holography // *Opt. Laser Technol.* — 1972. — N 4. — P. 28–30.
24. *Sugawara S., Murase K. and Kitayama T.* Holographic Recording by Dye-Sensitized Photopolymerization of Acrylamide // *Appl. Opt.* — 1975. — N 14. — P. 176–178.
25. *Wopschall R.H.* Dry Photopolymer Film for Recording Holograms // *J. Opt. Soc. Am.* — 1971. — **61**, N 649A.
26. *Colburn W.S. and Haines K.A.* Volume Hologram Formation in Photopolymer Materials // *Appl. Opt.* — 1971. — **10**, N 1636.
27. *Booth B.L.* Photopolymer Material for Holography // *Appl. Opt.* — 1972. — **11**, N 2994. — P. 32.
28. *Booth B.L.* Photopolymer Material for Holography // *Appl. Opt.* — 1975. — **14**, N 593.
29. Пат. 6574174 США. МКИ G11B 007/00 Optical Data Storage System with Multiple Layer Media / *Amble; James R.* (Redwood City, CA); *Hesselink; Lamberrtus* (Atherton, CA); *Honda; Tokyuki* (Mountain View, CA); *McDonald; Mark E.* (Milpitas, CA); *Morelli; Michael V.* (San Jose, CA); *Daiber; Andrew J.* (Palo Alto, CA); *Ferrier; Herman A.* (Scotts Valley, CA); *Ghose; Sanjoy* (Scotts Valley, CA); *Kridl; Thomas A.* (Los Altos, CA); *Lipson; Matthew* (Sunnyvale, CA); *Nishimura; Shunichi* (Tokyo, JP); *Sochava; Sergei* (Sunnyvale, CA); *Volz; LeRoy A.* (San Jose, CA) *Siros Technologies, Inc.* (Davis, CA) — № 549075; Заявл. 15.04.2000; Опубл. 03.06.2003; НКИ 369/44.26.
30. *Booth B.L.* Photopolymers for Laser Recording and KTP // *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* — 1977. — **123**. — P. 38
31. *Bartolini R.A., Bloom A., and Weakliem H.A.* Volume Holographic Recording Characteristics of an Organic Medium // *Appl. Opt.* — 1976. — **15**, N 1261
32. *Bloom A., Bartolini R.A., Hung P L.K., and Ross D.L.* Nonpolymeric Organic Host for Recording Volume Phase Holograms // *Appl. Phys. Lett.* — 1976. — **29**, N 483.
33. *Sukhanov V.* Recording Materials for Volume Holography // *SPIE Holography*. — 1994. — Vol. 4, N 2. — P. 1–2.

34. *Sunny Bains*. Photochromic/Dye-Doped Polymers as Media for Rewritable Optical Memories // SPIE. — 1995. — Vol. 5, N 1. — P. 1–2.
35. *F. Mok M., Tackitt C., and Stoll H.M.* Storage of 500 High Resolution Holograms in LiNbO₃ // Opt. Lett. — 1991. — Vol. 16, N 8. — P. 605, 607.
36. *Petrov M.P., Gaulfield J.D., Mokrushina E.V.* Noncoherent Double Phase-Conjugate Mirror Using Bi₁₂TiO₂₀ // Proc. SPIE. — 1991. — Vol. 1731. — P.18–28.
37. *Li Yulin, Zhao Mingjun, Qin Yuwen.* Studing the Perfomance of Crystal Material for Real-Time Holographic Recording and Display // Proc. SPIE. — 1991. — Vol. 1731. — P. 30–35.
38. *Zhu Weili, Chen Yansong.* Two Modified Models of Neural Network// Proc. SPIE. — 1991. — Vol. 1731. — P. 60–64.
39. *Yi-mo Zhang, Wang Fan.* A New Real-Time Optical Associative Memory System // Proc. SPIE. —1991. — Vol. 1731. — P. 65–73.
40. *Yan Yingbai, Wen Zhiqing, Wu Minxian, Jin Guofan.* Making Multifacet Holographic Array and Optical Implementation of Associative Memory // Proc. SPIE. — 1991. — Vol. 1731. — P. 85–88.
41. *Shen Jinyuan and Zhang Yanxin.* Optical Pattern Recognition System Based on WTA Model of Neural Networks // Proc. SPIE. — 1991. — Vol. 1731. — P. 89–93.
42. *Lambertus Hesselink and Jeff Wilde.* Recent Advance in Holographic Data Storage System // Proc. SPIE. — 1991. — Vol. 1731. — P. 74–79.

Поступила в редакцию 14.02.2004