

КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ
Кафедра оптики и нанофотоники

С.С. ХАРИНЦЕВ

**ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ХРАНЕНИЯ
ИНФОРМАЦИИ**

Учебное пособие

Казань – 2016

УДК 535.3

М2.ДВ6

Принято на заседании кафедры оптики и нанофотоники

Протокол № 23 от 03 марта 2016 года

Рецензент:

доктор физико-математических наук, профессор **В.В. Самарцев**

Казанский физико-технический институт КазНЦ РАН

Харинцев С.С.

Оптические методы хранения информации / С.С. Харинцев –
Казань: Казан. ун-т, 2016. – 74 с.

Учебно-методическое пособие посвящается ключевым достижениям и перспективам развития оптических технологий памяти, в котором освещаются физические принципы записи/чтения и хранения информации. В пособии дается описание основных методов хранения данных: 1) фотохромная память, 2) голографическая память, 3) фазовая память (халькогениды), 4) термоассистируемая магнитная память и 5) квантовая память. Обсуждаются преимущества и недостатки этих методов, а также приводятся примеры их использования в самых разных областях.

© Харинцев С.С., 2016

© Казанский университет, 2016

Введение

Хранение больших объемов информации (англ. – «big data») представляет собой, наряду с такими глобальными проблемами как перенаселение и климат, одну из актуальных и системных задач XXI века. С одной стороны, это требует развития и внедрения новых технологий для создания энергонезависимых физических носителей информации, с другой – обеспечения доступа к информационным ресурсам, такими как дата-центры и облачные сервисы. В обоих случаях ключевым аспектом является хранение данных, объем которых к 2020 году вырастет, по разным оценкам [1-4], до несколько десятков зеттабайт ($3\text{б} = 10^{21}$). Ежегодно совокупный объем данных удваивается; так, например, работа одного телескопа (Harlingten) в австралийской обсерватории на юге штата Тасмания генерирует 700 Тб (10^{12}) ежедневно [1]. Взрывной рост объема данных приведет к смещению спроса от мобильной памяти к стационарной благодаря масштабному внедрению облачных технологий [2]. В 2014 году всеми производителями было выпущено 560 млн. жесткий дисков HDD (от англ. – «Hard Disk Drive») с общей емкостью 1 Зб [1]. Тем не менее, спрос на хранение данных значительно превосходит текущее рыночное предложение производителей HDD и SSD (от англ. – «Solid-State Drive») (см. рис. 1), несмотря на то, что плотность записи данных в жёстких дисках увеличивалась в среднем на 40% в год, опережая темпы роста транзисторов на интегральных чипах в соответствии с законом Мура [5]. В 2012 году это плотность записи с использованием технологии перпендикулярной магнитной записи достигла предела. Это связано с достижением фундаментального (супермагнитного) предела – для увеличения плотности записи необходимо уменьшать размер магнитного домена на жестком диске. Вместе с этим увеличивается коэрцитивность магнитного материала, которая приводит к необходимости прикладывать достаточно сильные магнитные поля, чтобы эффективно

ориентировать магнитные моменты на диске и, соответственно, кодировать информацию. Однако применяемые поля значительно превышали магнитное насыщение используемых CoFe электромагнитов для записывающих головок.

Катализатором развития технологий хранения данных в ближайшие 10-20 лет станет Интернет вещей (англ. – «Internet of Things») [3], объединяющий в информационную сеть не только людей, но и окружающих их «умные» предметы (устройства). Несмотря на то, что спрос на хранение данных растет, развитие технологий записи и хранения данных происходит более медленными темпами. В частности, увеличение хранилища до ~Пб (10^{15}) на основе жёстких дисков HDD приведет к созданию дата-центра размером с футбольное поле (см. рис. 2). С другой стороны, масштабирование дата-центров становится не целесообразным из-за гигантских расходов электроэнергии. По данным агентства по охране окружающей

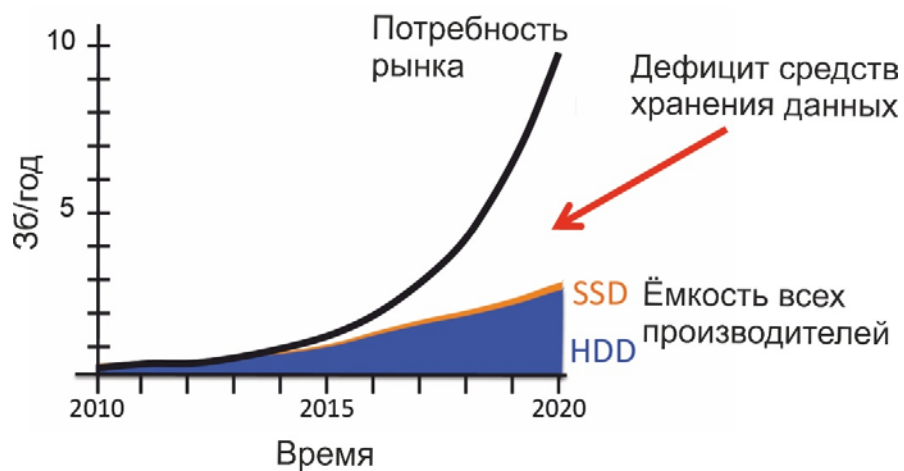


Рис. 1. Динамика темпа роста спроса и предложения физических носителей памяти [5].

среды при правительстве США [1], дата-центры, использующие жёсткие диски, в США потребляют 1.5 % валового объёма электричества, что составляет 4.5 млрд. долл. в год. Время жизни жёстких дисков ограничено, что вызывает миграцию данных каждые 2-3 года, в результате которой часть данных может быть потеряна. К

сожалению оптические технологии хранения информации (DVD, BlueRay диски и т.д.) не могут конкурировать с HDD в силу фундаментальных физических причин,



Рис. 2. Интеграция дата-центров с инфраструктурой облачных сервисов [1].

например, слабого взаимодействия света и вещества, и дифракционного предела Аббе, ограничивающего поверхностную плотность записи (<100 Гб). Однако бурное развитие нанофотоники в течение последних 15 лет привело к появлению принципиально новых оптических подходов записи и хранения информации [1], которые уже в ближайшем будущем смогут внести существенные изменения в структуру мирового рынка традиционных типов памяти, такими как HDD и SSD. Оптические диски с пета-битовой ёмкостью позволят в будущем кардинально изменить эффективность и производительность облачных сервисов (см. рис. 2).

В настоящем пособии проводится обзор наиболее перспективных с точки зрения практической реализуемости и коммерческой масштабируемости оптических технологий записи и хранения информации. Как и в случае с магнитной и электрической памятью главный фокус направлен на увеличение ёмкости памяти, скорости записи/считывания информации, возможности многократного перезаписывания и низкую стоимость единицы хранимой информации. Популярность оптических записывающих устройств (CD, DVD и т.д.), основанные на изменении оптических свойств физического носителя, например, за счет изменения степени прозрачности

или коэффициента отражения; связана с низкой себестоимостью физического носителя, удобством транспортирования и возможностью тиражирования. Информационная ёмкость оптических дисков, разработанных Blu-ray Disc Association, обладает рекордной (для оптики!) информационной емкостью 25 Гб для односторонних и 50 Гб для двусторонних носителей информации. Такая высокая информационная емкость достигается за счет применения полупроводникового лазера с длиной волны 405 нм, оптической системы с цифровой апертурой 0.8 и светочувствительного слоя толщиной 100 мкм. Тем не менее, развитие оптических технологий хранения данных ограничивается низкой скорости чтения/записи, ограниченным количеством перезаписи и наличия считывающей головки.

Наряду ставшими уже традиционными технологиями хранения информации ведется активный поиск альтернативных возможностей. К их числу можно отнести, например, молекулярную память, которая основана на технологии атомной туннельной микроскопии, позволяющей добавлять и удалять отдельные атомы в молекулу, наличие которых определяется с помощью чувствительной головки. Данная технология была впервые представлена в середине 1999 года компанией Nanochip [www.nanochipinc.com], и теоретически позволяла достичь плотности упаковки около 40 Гб/см², что в десятки раз превосходит существующие серийные образцы жесткий дисков. Однако говорить о практической реализации этой технологии преждевременно, по крайней мере в обозримом будущем с горизонтом 15-20 лет. Тем не менее в последнее время появились ряд технологий такие как спиновая STT память (от англ. – «Spin Transfer Technologies»), магниторезистивная память, мемристорная память, память на квантовых точках, память на углеродных нанотрубках и др. которые развиваются уже в формате стартапов с использованием ресурсов венчурных фондов. И в этих случаях говорить о скором массовом производстве новых устройств хранения данных преждевременно.

Обзор предлагаемых сегодня новых решений, концептов и технологий выходит за рамки настоящего пособия, в котором главный фокус направлен на следующие оптические методы хранения и чтения/записи информации: 1) фотохромная память, 2) голографическая память, 3) фазовая память (халькогениды), 4) термоассистируемая магнитная память и 5) квантовая память. Важно отметить, что не во всех из перечисленных выше методов память реализуется

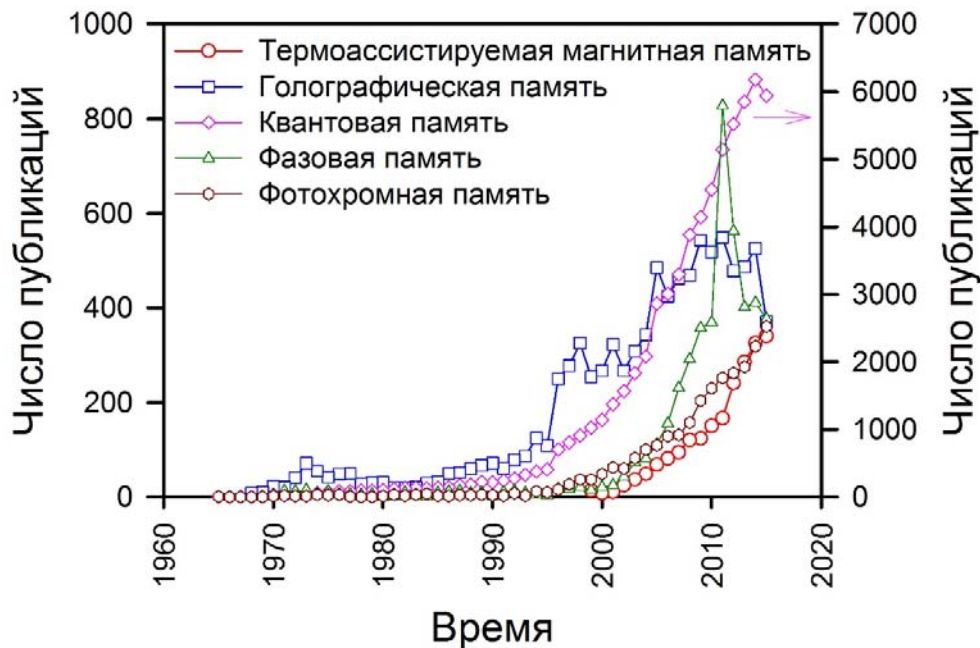


Рис. 3. Динамика числа публикаций в базе данных Scopus (www.scopus.com).

на физических принципах взаимодействия света и вещества. Однако свет или оптическое ближнее поле часто играют вспомогательную роль в качестве нагревательного элемента с высоким тепловым градиентом, например, в термоассистируемой магнитной памяти и фазовой памяти. Настоящий выбор методов записи и хранения информации обусловлен значительным научным заделом с одной стороны (см. рис. 3), и готовностью последних к коммерциализации в ближайшие 5-10 лет – с другой. Библиографический анализ публикационной активности демонстрирует в среднем устойчивый рост во всех вышеперечисленных областях на протяжении последних

15 лет. Взрывная динамика публикаций в области квантовой памяти связана с качественным технологическим скачком как в объеме записываемой информации (на несколько порядков по сравнению с нынешними устройствами хранения информации), так и в скорости ее обработки. Несмотря на очевидную привлекательность квантовой памяти фундаментальные трудности управления квантовыми состояниями не позволяют определить, даже примерно, временной горизонт их практического использования – даже при наличии работающего концепта. Аналогичная ситуация наблюдается в области развития голографической памяти, для которой уже разработаны работающие архитектуры поверхностной (2D) и объемной (3D) реверсивной записи информации с плотностью до 100+ Тб (ближнеполевая 3D голографическая память позволяет хранить до ~5 Пб); однако до сих пор эта технология остается в статусе «прототипа» (на сегодняшний день существуют более 50 прототипов [6,7]). Этот факт отражается в замедлении темпов публикационной активности в этой области (см. рис. 3). Вероятными сдерживающими факторами являются высокая стоимость хранения единицы объема информации и габариты. Однако в 2014 году компания Akonia Holographics LLC анонсировала «новую» технологию голографической записи, которая снимает эти ограничения (см. ниже).

Наиболее востребованной, с точки зрения практического использования, технологией записи и хранения информации является полупроводниковая энергонезависимая память (DRAM, NAND Flash и NOR Flash). Несмотря на ряд технологических преимуществ (см. Табл. 1) масштабирование рынка записывающих устройств с этим видом памяти не происходит из-за высокой стоимости хранения информации. В последнее время активно развивается фазовая резистивная энергонезависимая память на основе халькогенидов $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST), которые обратимо переключаются между аморфной фазой с высоким сопротивлением и кристаллической фазой с низким сопротивлением. Этот вид памяти имеет значительно более низкую себестоимость хранения единицы информации, легко масштабируется «сверху-

вниз» и демонстрирует лучшие показатели по скорости и ёмкости записи информации по сравнению обычными флэш-технологиями. По этим причинам фазовая память на халькогенидах с высокой вероятностью может вытеснить с рынка записывающих устройств уже активно используемую на практике резистивную флэш-память. Наблюдаемый спад в публикационной активности после 2010 года свидетельствует о «закрытии» темы для публичного доступа и активной коммерциализации этой технологии. Очевидно, этот вид памяти может быть основным драйвером рынка в ближайшие 10-15 лет.

Таблица 1.

Сравнительный анализ записывающих сред [7].

	Магнитная лента	Жёсткий диск	Оптический диск BluRay	Флэш память SSD
Стоимость/Тб среды, USD	24	112	450	900
Стоимость/Тб устройства, USD	118	270	485	1.755
Полная себестоимость, USD	3.2x	5.2x	13.2x	14.2x
Скорость записи, Мб/с	150	150	20/200	500
Плотность записи, Гб/дм ³	177	168	155	246
Время отклика	100 с	10 мс	10 с	10 мкс
Время жизни, год	20	5-7	50	10

До сих пор остаются привлекательными оптическая память на фотохромах и термоассистируемая магнитная память (HAMR). Возможность использования нового класса органических соединений (красителей), интегрированные в аморфные [8] и жидкокристаллические матрицы [9], в том числе фотонные кристаллы [10], позволяют с помощью оптического ближнего поля записывать информацию на одном хромофоре (размер пикса $\sim 1 \text{ нм}^2$) со скоростью ориентации $\sim 10\text{-}100 \text{ нс}$. Ёмкость записываемой информации может быть увеличена до нескольких Пб. Существенными недостатками фотохромной памяти являются низкая надежность и ограниченный срок службы. В настоящее время наблюдается экспоненциальный рост публикаций, связанных с применением азо-хромофоров (см. рис. 3), тогда как для другого класса фотохромов имеет место стагнация.

В контексте развития средств и методов хранения и обработки цифровых данных ключевой задачей является увеличение поверхностной плотности записи информации, в том числе за пределами физической реализуемости обычных методов (например, за пределами дифракции света). Несмотря на тот факт, что жесткие диски (HDD) доминируют на рынке физических носителей хранения данных (см. рис. 4), это направление не теряет своей актуальности благодаря новым возможностям, связанными с термо-магнитной записью и битовой структурой записывающей среды [5,11]. Термоассистируемая (или термо-индуцированная) магнитная память является сегодня одной из горячих тем, поскольку основные игроки на рынке записывающих устройств, такие как Seagate, Hitachi и Western Digital, анонсировали релиз жестких дисков HAMR HDD в ближайшие два года. В частности, одним из подразделений Western Digital – компанией HGST начато опытное производство первых жестких дисков объемом 10 ТБ, которые заполнены гелием. Это обеспечивает возможность использования большего количества пластин (в настоящее время до

7) и экономию энергии на 45 % на каждый Вт/Тб. Используя технологию вертикальной записи SMR, компании удалось разместить на каждой пластине 1.43 Тб данных [12].

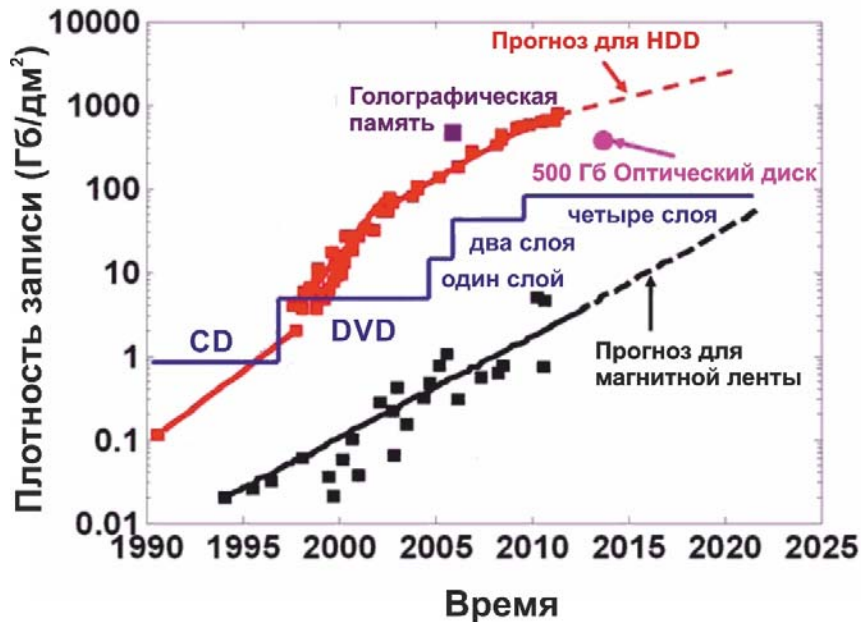


Рис. 4. Рыночная динамика развития носителей памяти [1].

Важно отметить, что из-за более низкой ёмкости (по сравнению с жестким диском) записи магнитных лент их практическое использование (в основном для бэкапа) по-прежнему не уменьшается. Ежегодный линейный рост объема рынка составляет 31.8% (см. Рис. 4). Обратная ситуация наблюдается для традиционных оптических дисков, перспектива для развития которых выглядит сомнительной из-за медленного прогресса их ёмкости и высокой стоимости хранения информации на 1 Гб. Возможный «прорыв» можно ожидать в направлении создания оптического диска ёмкостью до 500 Гб (см. Рис. 4). В настоящее время нет сомнения в скорой модернизации оптических дисков голографическими и ближнеполевыми битовыми технологиями. Как и в случае с магнитными лентами, оптические диски будут еще

долго востребованы, по крайней мере, для резервного копирования [2]. Продолжающийся поиск новых физических принципов и механизмов направлен на создание многомерного хранения данных с ёмкостью и скоростью доступа к информации на 2-3 порядка превышающие возможности современных технологий.

Оптическая память на фотохромах

Фотохромная память основана на использовании флуоресцирующих красителей или хромофоров, спектры поглощения которых могут существенно меняться при изменении их электронной конфигурации. Эти изменения могут происходить, например, в ходе фотохимической реакции органического соединения, его фотоизомеризации, фотодиссоциации, фотоионизации или фотозамещения. Фотохромизм органических и неорганических соединений основан на обратимых фотохимических реакциях и фотофизических процессах T-T поглощения и S-S просветления.

Перспективы повышения информационной емкости оптических дисков обычно связывают с созданием многослойных светочувствительных покрытий для побитовой регистрации информации и толстых (>2 мм) светочувствительных слоев для голографической регистрации информации. Такие информационные носители обеспечивают реализацию трехмерной оптической памяти с плотностью записи более 1 Тб за счет двухфотонной записи и воспроизведения информации в различных слоях регистрирующей среды в случае побитовой оптической памяти или под различными углами падения активирующего и восстанавливающего лазерного излучения в случае голографической оптической памяти [13-15]. Безусловно, разработка таких реверсивных дисков связана с использованием светочувствительных органических сред, испытывающих фотохимические превращения. Такие среды, в принципе, по сравнению с используемыми в настоящее время термочувствительными материалами обладают более высокой разрешающей способностью.

Для создания реверсивных оптических дисков, обеспечивающих побитовую запись, перезапись и считывание оптической информации в каждом слое многослойной регистрирующей среды, активно ведется разработка двухфотонных фотохромных регистрирующих сред [16,17]. Такие среды разрабатываются, в основном, в США (фирма Call/Recall Corporation, Irvine and San Diego Universities of California) и Японии (Japan Science and Technology Corporation, Kyushu, Osaka, and Shizuoka

Universities). В этих разработках используются полимерные растворы термически необратимых фотохромных соединений различных классов: диарилэтенон, фульгидов, фульгимидов, феноксипроизводных феноксиафтаценхинон и др. [18,19]. Анализ результатов исследований, выполненных в этой области, показывает, что наибольшее внимание уделяется разработке фотохромных полимерных регистрирующих сред для 3D оптической памяти на основе термически необратимых диарилэтенон из класса гексафторциклопентеновых производных диарилэтена. Серьезным недостатком этого класса соединений являются высокие трудоемкость и себестоимость их синтеза. Поэтому поиск доступных и дешевых фотохромных соединений из класса производных диарилэтенон представляет важную задачу при создании фотохромных полимерных материалов и многослойных регистрирующих сред.

В существующих устройствах памяти запись информации производится на поверхности активной среды. Принцип трехмерной оптической памяти показан на рисунке 5. В качестве активной среды используются бистабильные фотохромные соединения и запись производится при помощи метода двухфотонной спектроскопии, когда необходимая для реализации фотохимической перегруппировки энергия доставляется в определенную точку объемного материала двумя квантами, суммарная энергия которых соответствует энергии возбуждения. Считывание записанной информации осуществляют посредством регистрации флуоресценции, которой должен обладать один из изомеров фотохромной системы [20]. Устройства трехмерной оптической памяти могут обеспечить колоссальную плотность информации. Даже при использовании лазера с излучением 532 нм (см. рис. 5) плотность записанной информации составляет около 10 Тб/см^3 , а при использовании УФ лазеров эта величина может быть повышена еще на порядок. К материалам для устройств трехмерной оптической памяти предъявляются очень жесткие требования: отсутствие фотодеградации, высокие сечения двухфотонного поглощения, высокие выходы

флуоресценции. Спиропираны, использованные в первых опытах по созданию таких устройств не обладают достаточно высокой фотоустойчивостью и характеризуются относительно низкоинтенсивной флуоресценцией окрашенной формы [21]. Значительными преимуществами обладают материалы на основе фотохромных 2-индолилфульгидов. Эти соединения отличаются исключительно высокой термической устойчивостью, а их циклические изомеры проявляют флуоресценцию, по которой производится считывание информации. На основе этих соединений произведены первые многослойные флуоресцентные диски трехмерной оптической памяти емкостью 140 Гб [13,14]. Достоинством индолилфульгидного диска является возможность перезаписи информации, однако серьезный недостаток этой фотохромной системы – весьма слабая флуоресценция фотоокрашенной формы (квантовый выход – порядка 10^{-3}). Кроме того, в условиях двухфотонной записи наблюдается заметная и довольно быстрая фотодеградация соединений. Индолилфульгидную систему трехмерной памяти удалось значительно усовершенствовать, гибридизовав 2-индолилфульгимид с обладающим интенсивной люминесценцией оксазиновым красителем. Оксазин флуоресцирует в длинноволновой области спектра, что позволяет избежать нежелательного перекрытия полос поглощения для записи и считывания информации. Интенсивность флуоресценции этого красителя сильно зависит от полярности среды и ближайшего окружения молекулы. Исходная малополярная открытая форма А интенсивно флуоресцирует в полимерной матрице, тогда как инициированный облучением в дальней УФ-области переход в более полярную циклическую форму В приводит к практически полному тушению флуоресценции. В результате система работает следующим образом: 1) при облучении лазерным светом с длиной волны 400 нм производится запись информации, 2) при облучении светом с длиной волны 530 нм реализуется обратная реакция с образованием флуоресцирующего изомера А, 3) считывание осуществляется на длине волны флуорес-

ценции (685 нм) оксазинового остатка при облучении светом 650 нм, который возбуждает только флуоресценцию, но не влияет на фотопроцессы. Для создания многослойных оптических дисков нового поколения с информационной ёмкостью более 1 Тб, обеспечивающих создание 3D оперативной оптической памяти, разработан

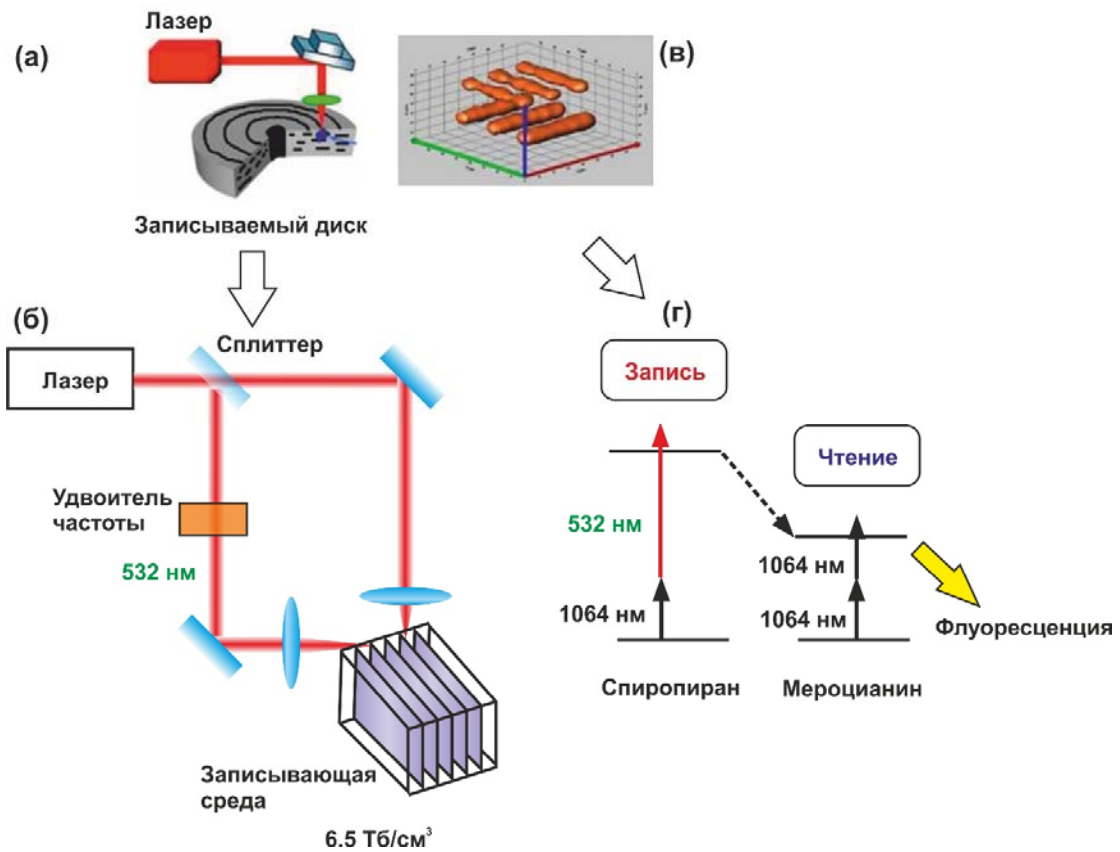


Рис. 5. Принцип трехмерной оптической памяти с двухфотонной записью и флуоресцентным считыванием.

новый класс термически необратимых диарилэтенон, а именно арил-замещенных циклопентеновых бензтиенил производных диарилэтенон [8]. Многослойные фотохромные регистрирующие среды создаются путем повторяющегося нанесения оптически прозрачных полимерных слоев толщиной 40-50 нм методом фотополимеризации акриловых олигомерных композиций и фотохромных регистрирующих

слоев толщиной 10 мкм методом центрифугирования. На основе фотохромной системы, представленной на рисунке 5, и характеризующейся следующими параметрами: квантовый выход флуоресценции в полиметилметакрилатной матрице $\Phi=0.16$, цикличность $>10^4$, компания Call/Recall объявила о создании 500 слойного флуоресцентного диска емкостью 1 Тб, что соответствует емкости примерно 250 DVD дисков. Площадь одного бита на терабитном многослойном диске компании Call/Recall составляет примерно $100 \times 100 \text{ нм}^2$, что соответствует пятну из нескольких тысяч фотохромных молекул. Следует отметить, что эти диски работают при использовании стандартных DVD или CD приводов. Важно отметить, что не сегодняшний не существует физических ограничений для создания бита на подобных дисках до размеров одной молекулы.

Фотохромные полимеры крайне чувствительны к поляризации падающего света, которая вызывает изменение ориентации молекул в пространстве. Данный вид материалов пробуют применять в известных технологиях записи, таких как HD-DVD диски (использования полимерных записывающих слоев могло бы позволить создать DVD диск с многократной записью). Фотохромизм органических и неорганических систем основан на обратимых фотохимических реакциях. Фотохромные среды на данный момент не могут применяться в технологиях долгосрочной оптической памяти в силу низкой термостабильности и проблем неразрушающего считывания записанной информации. Решение этих проблем связано с синтезом новых соединений, в том числе структурных модификации известных фотохромных веществ. Изготовления фотохромных записывающих сред с термической стабильностью возможны с использованием фульгидов и фульгимидов [22], арилокси-хинонов [23], диарил-этиленов с гетероциклическими кольцами [24] и производных антрацена [25]. Среди них фотохромные системы на основе производных фенокси-нафтацен-хинона демонстрируют лучшую устойчивость по отношению к необратимым

фотоиндуцированным превращениям, в ходе которых ана-структуры преобразуются в хитонные структуры при взаимодействии со светом.

Фотохромные перфтор-циклопентены с обратимыми преобразованиями [24], производные фенокси-нафтацен-хинона [23] и фторированные диарилэтены с несимметричных гетероциклических фрагментов [24] продемонстрировали чувствительность к диапазону излучения, совпадающему с длинами волн полупроводниковых лазеров 680-830 нм. Для уменьшения фоторазложения записанной информации при ее считывании в фотохромных средах на основе фенокси-нафтацен-хинона используются изменения показателя преломления для этого носителя информации [24].

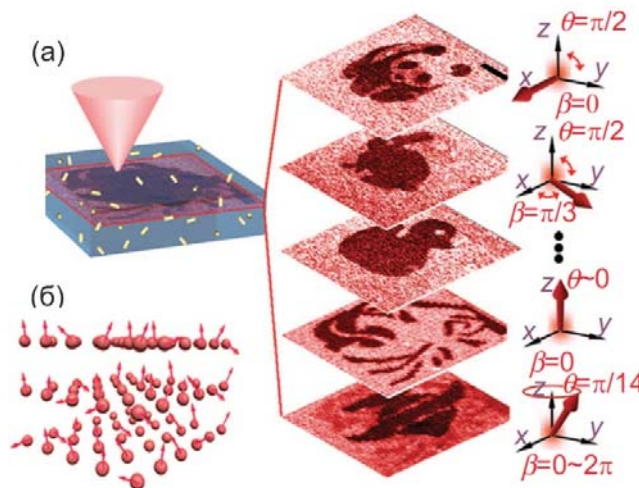


Рис. 6. 3D поляризационная запись [1].

Суперпозиция лазерных мод высокого порядка позволяет создавать сложное распределение поляризации сильно сжатого света, которое может быть использовано для многомодовой 3D поляризационной записи (см. рис. 6(a)) [1]. Простым примером является смешение сильно сфокусированного радиально поляризованного света, вектор напряженности электрического поля которого направлен вдоль волнового вектора, и азимутального поляризованного света с вектором напряжен-

ности электрического поля, лежащего в плоскости падения света. Такой дизайн лазерных пучков часто используется во флуоресцентной микроскопии сверхвысокого разрешения (STED, FRET и др.). Управление поляризацией возбуждающего излучения позволяет осуществлять послойную запись на фоточувствительных активных слоях (см рис. 6(б)) [1]. Дополнительную степень свободы для 3D оптической записи обеспечивает орбитальный момент лазерных пучков [26]. Дизайн поляризации света достигается с помощью нано-структурированных фазовых пластинок [27] или с помощью плазмонных метаповерхностей [28].

Для увеличения плотности записанной информации с помощью фотохромных молекул применяется оптическое ближнее поле, которое генерируется суб-волновыми апертурными и безапертурными зондами (оптическими антеннами). Однако ключевой проблемой при использовании ближнего поля является определение и управление его поляризацией. Для плазмонных металлических наномантенн эта задача решена исследовательскими группами под руководством д-ра Р. Verma (Osaka University, Japan) [29] и д-ра С.С. Харинцева (Казанский Федеральный университет, Россия) [30]. С технологической точки привлекательной является SNOM-технология (от англ. – «scanning near-field optical microscopy»), с помощью которой ближнее поле создается в окрестности субволновой апертуры косунообразного оптического волокна. Однако поляризационное состояние такого сжатого света трудно контролировать. Работы в этом направлении ведутся группой д-ра G. Florio (Ruhr-Universit Bochum, Germany), которая исследует SNOM поляризацию с помощью азо-модифицированных аморфных полимеров [31].

Перспективными фотохромными материалами для записи и хранения информации являются азобензольные жидкие кристаллы [32-37], в которых азобензольные боковые цепи играют роль мезогенов и хромофоров одновременно. Было показано, что транс-форма азобензола стабилизирует нематическую жидкокристалличе-

скую фазу, тогда как его цис-форма дестабилизирует жидкокристаллическое состояние (см. рис. 7). Таким образом, благодаря транс-цис-фотоизомеризации азобензола полимерные жидкие кристаллы (например, РА6АВ2 [32]) могут быть использованы в качестве активной записывающей среды. Однако фазовый переход из жидко-кристаллического в изотропное состояние под действием импульса с длиной волны 355 нм осуществляется в течение нескольких мс, несмотря на тот факт, что длительность транс-цис-фотоизомеризации для одного азо-хромофора составляет 1-5 нс. Поэтому если все азо-хромофоры когерентно перестроятся в течение этого времени, то такая фотохромная среда может вполне конкурировать с фазовой полупроводниковой памятью на халькогенидах (см. ниже). Восстановление нематической фазы осуществляется при температуре выше температуры стеклования T_g полимерного жидкого кристалла (45 °С для РА6АВ2). Фото-индуцированный нагрев полимера осуществляется 10 нс лазерным импульсом с длиной волны 1064 нм (YAG-Nd) и мощностью 1 Дж/см². Широкий температурный диапазон для нематической фазы делает полимерный жидкий кристалл перспективным материалом для хранения оптических изображений. Запись изображения осуществляется лазерным импульсом с длиной волны в зоне поглощения азобензольного мезогена, а его стирание выполняется путем фото-индуцированного нагрева выше температуры стеклования. Развитием этого направления является создание ультратонких (<10 нм) аморфных или жидкокристаллических азополимеров, оптический дихроизм которых управляется ближним полем с пространственным разрешением 1-10 нм. Такие материалы позволят в будущем записывать оптическую информацию с плотностью до ~1 Пб со скоростью 1+ Гб/с.

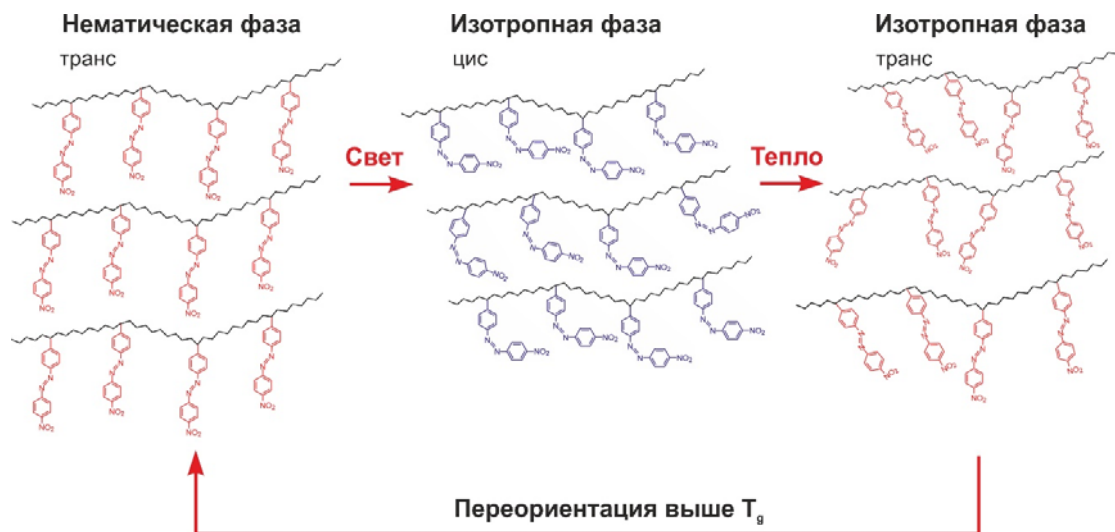


Рис. 7. Переориентация транс-азобензольного мезогена под действием света и тепла [32].

Поляризационное ближнеполевое мультиплексирование позволяет обеспечить многослойную запись и, таким образом, дополнительно увеличить ёмкость оптической памяти, по крайней мере, на один порядок. Аморфные азо-полимерные пленки, на основе эпоксиаминных олигомеров [38], имеют бистабильные термодинамические состояния и испытывают фазовый переход в жидкокристаллическую мезо-фазу под действием света или электрического поля. Фотоориентирование азохромов осуществляется при малых интенсивностях лазерного поля – несколько мкВт/см². Существенным недостатком таких фотореактивных материалов является характерная для полимеров зависимость температуры стеклования от толщины пленки, что может заметно ограничивать тепловую стабильность таких записывающих сред. Недеструктивное оптическое считывание информации зачастую может приводить к нежелательной дезориентации фотохромов и, следовательно, потере данных. Эффективным решением является использование нелинейно-оптического эффекта – генерации второй гармоники, с помощью которого удалось продемонстрировать чтение информации на Ленгмюр-Блоджетт пленках нитро-окто-

декил-азобензола, на фоточувствительных тонких пленках бактериродопсина и на пленках редко-земельного железо-содержащего граната [39].

В заключении этого раздела отметим, что 3D фотохромная реверсивная оптическая память продолжает активно развиваться в направлении поиска легко доступных и дешевых записывающих сред. До сих пор ведутся активные исследования по синтезированию новых материалов с большей термостабильностью, нацеленные на улучшение взаимодействия света и среды, и увеличение скорости изменения ориентации фотохромных молекул под действием света и электрического поля. Как было отмечено выше, в ближайшей перспективе основные усилия будут направлены на развитие 3D фотохромной памяти с использованием лазерного света с *орбитальным моментом* [26].

Термоассистируемая магнитная память

Технология термоассистируемой (или термо-индуцированной) магнитной записи (англ. – «heat-assisted magnetic recording» (HAMR)) является эволюционным преемником уже используемой технологии перпендикулярной магнитной записи, используемой при создании жестких дисков для стационарного хранения данных. Эта технология позволяет снять ограничение супермагнитного предела для записываемой магнитной поверхности, возникающего из-за уменьшения размеров магнитных доменов, которое необходимо для увеличения плотности записи данных. Локальное увеличение температуры приводит к уменьшению коэрцитивности магнитного материала и, таким образом, становится возможным использовать значительно меньшие значения магнитного поля для записи информации. Пионером в этой области является американская компания Seagate Technology, которая ведет разработки с 1998 года. Аналогичные работы по созданию жестких дисков с гибридной технологией, интегрирующей магнитооптическую запись и магнитное чтение, проводят Fujitsu и Hitachi. Несмотря на множественные заявления Seagate Technology о релизе HAMR HDD, до сих пор жесткий диск нового поколения остается за кадром. Основные трудности связаны с разработкой записывающей головки со встроенным ближнеполевым транзьюсером (от англ. – «near-field transducer» NFT) для оптического сильно-градиентного нагрева за пределами дифракции света и с созданием помехо-устойчивой и сильно-анизотропной записывающей среды с гранулированной структурой <math>< 5\text{ нм}</math> на основе FePt [40]. На сегодняшний день достижимый предел для термомагнитной записи составляет 5.8 Тб/дм^2 . Это значит, что 3.5-дюймовые жесткие диски смогут размещать данные от 50 до 70 Тб [41-43]. Одного такого диска будет достаточно, чтобы записать на него в незаархивированном виде все материалы библиотеки Конгресса США [44].

Важно отметить, что наряду с термо-ассистируемой магнитной памятью, являющейся инновационным решением для дальнейшего увеличения плотности информации, активно исследуются альтернативные подходы, такие как: 1) черепичная магнитная запись (от англ. – «Shingled Magnetic Recording», SMR) и 2) побитовая магнитная запись (от англ. – «Bit-Patterned Magnetic Recording» BPMR). В первом случае запись осуществляется последовательно с перекрытием магнитных дорожек, которые напоминают черепицу. SMR запись на пересекающихся дорожках сильно напоминает архитектуру SSD NAND памяти и по всей вероятности будет использована в основном при создании хранилищ с большим объемом данных с последовательной записью [41]. Второй тип памяти связан с созданием изолированных магнитных доменов, которые не интерферируют друг с другом при записи/чтении данных. К сожалению, возможности литографического оборудования не позволяют сегодня достичь плотности BPMR записи, достигнутой на непрерывных носителях с нано-гранулированной структурой. С появлением оптических литографов (временной горизонт – 5-7 лет!), обеспечивающих ~5-8 нм топологический масштаб, побитовая BPMR запись будет иметь конкурентное преимущество перед непрерывными магнитотвердыми носителями. Перспективной выглядит комбинация этих двух технологий записи, для которой в работе [41] показана возможность достижения плотности записи, достигающей 10 Тб/дм².

Важно отметить, что для преодоления супермагнитного предела HAMR технология обеспечивает доступ не только к широкому классу магнитотвердых материалов с высокой анизотропией, способных перемагничивать термически стабильные магнитные моменты малых размеров (размер дорожки меньше 50 нм, см. рис. 8), но и открывает путь к сильным градиентам магнитного поля для более плотной записи. Принципиальная схема HAMR системы показана на рисунке 9(а), которая состоит из HAMR записывающей головки, в которую интегрирована NFT оптическая си-

стема для локального фото-индуцированного нагрева, и записывающего магнитного слоя. В момент нагревания (см. рис. 9 (б)), выше температуры Кюри, коэрцитивность последнего заметно уменьшается так, что магнитные домены могут быть ориентированы достаточно слабым магнитным полем, создаваемым CoFe электромагнитом в записывающей головке. Информация записывается путем охлаждения

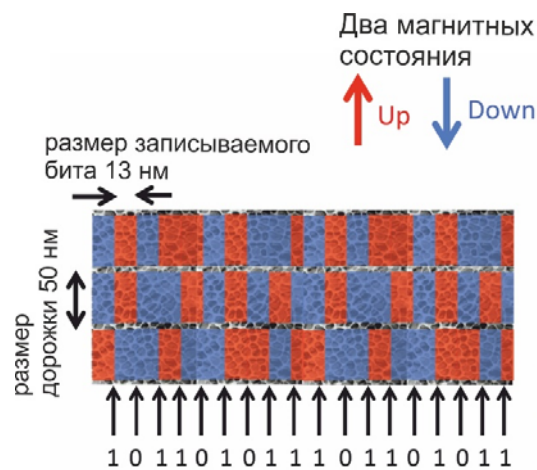


Рис. 8. Нано-гранулированная структура записываемых непрерывных магнитных дорожек.

записанной области, которая может находиться в термически равновесном состоянии бесконечно долго. Чтение записываемой информации (переходного состояния, как показано на рис. 9) осуществляется стандартными средствами, например, с помощью перпендикулярной магнитной записи. Процессы нагрева, записи и охлаждения происходят в таком же временном масштабе как и обычная магнитопись (~1 нс). Чтобы обеспечить высокую плотность записи ($2+ \text{Тб/дм}^2$), размер нагреваемой области не может превышать размера записываемой дорожки (<50 нм). Субволновая фокусировка оптического поля может получена с помощью локализованного плазмонного резонанса, возбуждаемого в золотом нанорде длиной 15 нм, который

интегрирован в золотой диск толщиной 25 нм и диаметром 200 нм. Ширина нанорода должна быть меньше размера магнитного пита (< 10 нм). Для нагрева объема $50 \times 15 \times 10$ нм³ FePt до 400 °С в течение 200 пс требуется около 45 мкВт [5]. Рабочие

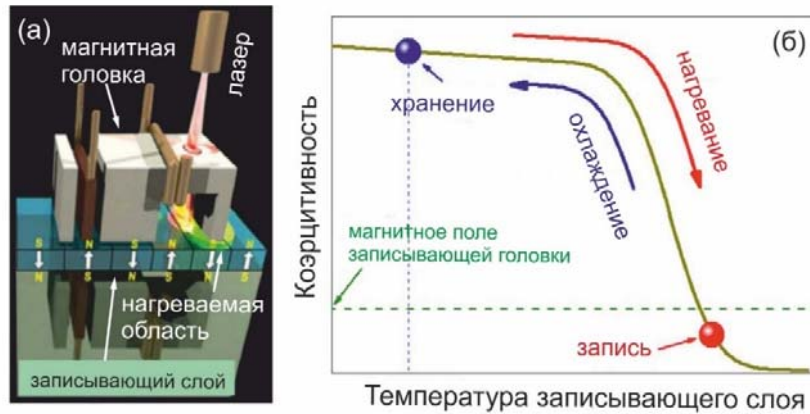


Рис. 9. Принципиальная схема термоассистированной магнитной записи (а), зависимость коэрцитивной силы от температуры среды.

температуры для разных материалов могут варьироваться в диапазоне 400-2000 °С. В этом контексте золото не является подходящим плазмонным материалом для коммерческого прототипа NFT. Перспективными материалами для нанорода являются тугоплавкие нитриды металлов переходной группы (TiN, ZrN, и т.д.) с температурами плавления > 3000 °С. Группой проф. В. Шалаева (Purdue University, USA) было показано, что эпитаксиально выращенный стрип из нитрида титана способен возбуждать плазмонный резонанс с добротностью, сопоставимой с добротностью резонанса для золота [45].

К сожалению, ближнеполевые транзьюсеры имеют малый коэффициент передачи в дальнем поле [46], что затрудняет их использование в рамках технологии NARM. Например, для диафрагмы размером 50 нм эффективность передачи для видимого излучения оказалась менее 10^{-5} . Однако нельзя рассматривать NFT устройство изолировано от технологии NARM, поскольку носителями информации являются металлические структуры, которые сильно влияют на взаимодействие NFT и

падающего поля. Были поставлены различные опыты с использованием круглых диафрагм для записи. Первый эксперимент был поставлен Бетзигом [47,48]. С помощью оптического волокна вытянутого в зонд 100 нм и покрытый алюминиевой оболочкой удалось достичь размера магнитной метки ~60 нм, что соответствует плотности записи 45 Гб/дм². Но при этом из-за малой мощности передатчика (<50 нВт) скорость передачи данных была малой (10 кГц). Развитие использования оптики ближнего поля в HAMR памяти связано с использованием различных форм отверстий и наноантенн. Отверстия формы «галстук-бабочка» [49], треугольное отверстие [50], L-отверстие [51] используются при применении эффекта плазмонного резонанса для увеличения скорости передачи данных при записи.

Одной из важных задач является выбор материала для активного записывающего слоя, который был бы устойчив к локально-высоким температурам. С одной стороны, при нагревании должен сохранять термическую стабильность поверхностный защищающий слой, над которым движется непосредственно магнитная головка, с другой – необходимо избегать химического упорядочивания и образования более крупных кристаллических доменов с повышением температуры. Высокую магнитную анизотропию демонстрирует другой класс материалов SmCo₅ и Fe₁₄Nd₂B. Однако необходимое состояние для магнитной записи сложно получить с помощью технологии магнетронного распыления. С другой стороны, из-за наличия редко-земельных элементов, эти материалы имеют высокий потенциал к коррозии.

Среди наиболее перспективных претендентов на роль записывающего магнитного слоя выступают сплавы CoPtX, CoPt(Pd)X, FePt(X), MnAl и редко-земельные металлы переходной группы [5,11,43]. Все эти сплавы нашли широкое применение в перпендикулярной магнитной записи. На сегодняшний день наиболее перспективным материалом для HAMR технологии является FePt, который обладает не только

высокой магнитной анизотропией, но и подходящей наногранулированной структурой (~5 нм), позволяющей избежать интерференционные помехи при чтении/записи данных. Добавление углерода в сплав FePt, с процентным содержанием 12%, делает композит FePt:C хорошо наногранулированным для сверхплотной записи. Вместо углерода, могут быть использованы такие оксиды как: MgO, SiO₂, CoCrPt:oxide и др. [5], которые значительно улучшают эффективность записи информации. Тем не менее, в настоящее время, имеет место ряд задач, направленных на улучшение наноструктуры записывающей среды, шероховатости и распределения поверхностной магнитной анизотропии.

Таблица 2.

Свойства сильно анизотропных магнитных материалов.

Type	material	K ₁ (10 ⁷ erg/cm ³)	M _S (emu/cm ³)	H _K (kOe)	T _C (K)	D _P (nm)
Co-alloy	CoCr20Pt15	0.3	330	18.2		14.4
	Co3Pt (L1 ₂)	2	1100	36.4		6.9
	(CoCr)3Pt	1	800	25.0		10.2
	CoPt3	0.5	300	33.3	600	9.7
Multilayer	Co2/Pt9	1	360	55.6	500	6.6
	Co2/Pd9	0.6	360	33.3	500	9.1
L1 ₀	FePd	1.8	1100	32.7	760	7.8
	FePt	7	1140	122.8	750	2.6
	CoPt	4.9	800	122.5	840	3.0
R.E.	SmCo5	20	910	439.6	1000	1.4

Также были предприняты попытки использовать перпендикулярные магнитооптические среды для термомагнитной записи. Однако низкие значения магнитного момента таких сред не обеспечивают требуемое магниторезистивное чтение данных на основе магнитооптического эффекта Керра. Для этой цели было предложено использовать двойные слои – один TbDyFeCo с низкой коэрцитивностью и высоким магнитным моментом для записи, другой TbFeCo с высокой коэрцитивностью при комнатной температуре – для чтения [11]. Katayama и др. [52] из Sharp предложили

использовать один магнитооптический слой для термоиндуцированной записи и чтения. Для компенсации температуры они использовали редко-земельный сплав $Tb_{23}Fe_{22}Co_{55}$, с помощью которого можно осуществлять одновременно запись и чтение информации.

Как было отмечено выше, важным параметром в HAMR технологии является температура Кюри. Для большинства магнитных материалов, приведенных в таблице 2, температура Кюри изменяется в диапазоне от 750 до 1000 К. Такой температурный диапазон сильно ограничивает применение золотых нанородов для локального нагрева с помощью субволнового сжатия света. Управлять температурой Кюри магнитных сплавов можно путем их допирования атомами никеля. В частности, для FePt сплавов с 30% содержанием Ni удалось уменьшить температуру Кюри до 400 К. Однако, с понижением температуры ухудшается анизотропия магнитной записывающей среды. Аналогичным образом можно уменьшить влияние химического упорядочивания в магнитных сплавах путем добавления Ag или Cu [11].

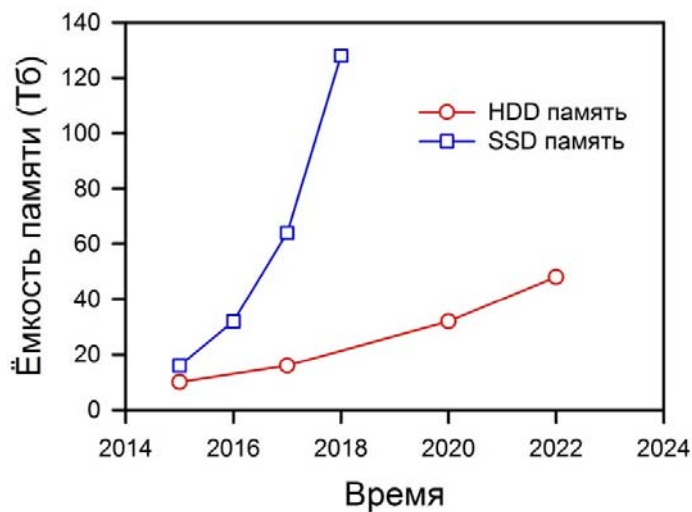


Рис. 10. Рыночная динамика развития носителей памяти HDD и SSD [53].

При коммерческой реализации HAMR так же важно решение сугубо прикладных задач, такие как дизайн записывающих головок, поиск дешевых в производстве материалов с высокой магнитной анизотропией, и создание архитектуры жесткого диска. Одна из первых задач – это доставка света непосредственно к записывающей головке. Поскольку записывающую головку необходимо сделать максимально мобильной, было предложено несколько методов доставки света. Первый наиболее простой подход заключается в размещении лазера непосредственно на записывающей головке. Для реализации этого метода были разработаны маленькие лазерные диафрагмы (VSALs) [54,55], основным преимуществом которых является отражение света обратно в резонатор, в котором возникает дополнительное вынужденное излучение. Другими способами для транспорта света являются использование оптических наноантенн и оптических волокон [56]. Если записывающая головка включает в себя твердо иммерсионную линзу (SIM), то проецирующее зеркало может быть расположено так, чтобы отразить свет лазера прямо на линзу. SIM активно используются для системы записи [57], хотя высокая кривизна SIM делает его неудобным методом получения дифракционного пятна нужного размера. Наконец, лазерный луч может быть соединен в плоском волноводе с помощью дифракционной решетки [58].

По данным агентства Softpedia, компания Seagate планирует разработать прототип HAMR HDD с емкостью 10 Тб к концу 2016 года [59]. После тестирования в течение двух лет, компания анонсирует первые продажи жестких дисков в 2018 году. Однако первые продукты будут внедряться только через облачные сервисы и дата-центры и, в случае успеха, масштабирование распространится на розничный сегмент. К 2025 году усилия консорциума производителей жестких дисков HDD ASTC будут направлены на достижение плотности записи 100+ Тб. Главными конкурентами компании Seagate выступают Samsung, Toshiba и Sandisk, усилия которых направлены на создание флэш-памяти нового поколения (3D BiCS NAND) с

ёмкостью до 128 Тб к концу 2018 года (см. рис. 10). Существенными недостатками флэш-памяти является высокая стоимость хранения 1 Гб информации и низкие показатели циклов перезаписи. Несмотря на это, прогнозируемая динамика роста ёмкости для SSD памяти значительно превосходит развитие HDD дисков с учетом технологии HAMR технологии (см. рис. 10).

Основными задачами по реализации HAMR технологии в настоящее время являются: 1) разработка дешевых в изготовлении сильно анизотропных магнитотвердых материалов, 2) повышение плотности записи с помощью оптики ближнего поля – увеличение эффективности передачи излучения; 3) выбор оптимального метода магнитной записи (сегодня используют технологии параллельной и перпендикулярной записи); 4) дизайн считывающей NFT головки, 5) технологические задачи подвода локального нагрева и охлаждения и ряд других.

Память на фазовых переходах (халькогениды)

Наряду с представленными в настоящем пособии физическими принципами записи/чтения и хранения информации энергонезависимая полупроводниковая фазовая память (от англ. – «Phase Change Memory» PCM), основанная на использовании халькогенидных стекол, представляет наиболее перспективную технологию для дальнейшего развития, коммерциализации и масштабирования. Популярная в настоящее время твердотельная зарядовая память (DRAM, NAND Flash или NOR Flash) имеет фундаментальные ограничения, связанные с неустойчивостью хранения электрического заряда при уменьшении ячейки памяти. Другим словами, такая память не масштабируется. Безусловно возникает потребность в развитии новой без-зарядовой платформы хранения данных и формирования на ее основе нового целевого рынка резистивной памяти [60]. Данный вид памяти составляет серьезную конкуренцию зарядовой памяти свободного доступа (DRAM) и флэш-памяти (см. табл. 3), благодаря масштабируемости «вниз», низкой себестоимости и высокой производительности. Несмотря на то, что в настоящее время реализована технология фазовой памяти на программируемом масштабе ~58 нм [61], не существует физических ограничений для достижения минимального размера записывающего бита – 2-5 нм. Кроме того, фазовая технология позволяет реализовать многобитовый режим записи данных благодаря широкому диапазону сопротивлений, достигаемых халькогенидным сплавом, в процессе фазового перехода из аморфного в кристаллическое состояние. Тем не менее до сих пор ведутся активные исследования по уменьшению программируемых токов и расходуемой энергии.

Запись и считывание информации в PCM основано на изменении электрического сопротивления некоторого малого объема вещества. Активный материал элемента памяти PCM, находящийся в аморфной фазе, имеет высокое сопротивление. В поликристаллической фазе, напротив, — низкое сопротивление. Изменение фазового состояния материала вызывается за счет локального нагрева, возникающего

при прохождении тока. Резистивный нагревающий элемент контактирует со слоем халькогенидного материала, и ток, протекающий через нагревающий элемент, вызывает изменение фазы. Первые материалами для фазовой памяти были стекла на основе теллура Te и эвтектические сплавы теллура и германия (Te и Ge), легированные различными элементами – сурьмой Sb, серой S и фосфором P [62]. В этих материалах наблюдается изменение фазы вещества при нагревании, и они бы могли быть использованы для электронного хранения данных, но время кристаллизации этих материалов было порядка микросекунд.

Таблица 3.

Сравнительный анализ основных характеристик между зарядовой памятью свободного доступа (DRAM) и классом без-зарядовой резистивной памяти (PCM, MARM и RRAM)

	DRAM	PCM	MRAM	RRAM
Размер ячейки	8F2	4F2	8F2	8F2
Время ожидания, нс	50	200	50	200
Число перезаписи	10^{15}	10^{6-12}	10^{15}	10^5
Время жизни	64 мс	10 лет	10 лет	10 лет

В 1990 году компании Energy Conversion Devices Inc. и Ovonyx Inc. разработали новый тип реверсивной полупроводниковой памяти, основанной на быстром (~20 нс) фазовом переходе из аморфного в кристаллическое состояние и обратно в халькогенидных стеклах, например, в сплаве $Ge_2Sb_2Te_5$, который используется в коммерческой ячейке памяти OUM (от англ. – «Ovonic Unified Memory») [63]. Этот материал имеет температуру стеклования ~350 °C и температуру плавления ~610

°C. Нагревая материал коротким импульсом тока (~ 1 мА) выше температуры плавления, он переходит в аморфное состояние, соответствующее состоянию RESET (0) (см. рис. 11(a)). Для записи данных этот материал нагревается более длительным импульсом при температуре чуть ниже температуры плавления, при которой происходит кристаллизация и программирование SET (1) (см. рис. 11(a)). Уникальность халькогенидного сплава определяется электронными свойствами аморфного и кристаллического состояния, для которых электрическое сопротивление отличается на

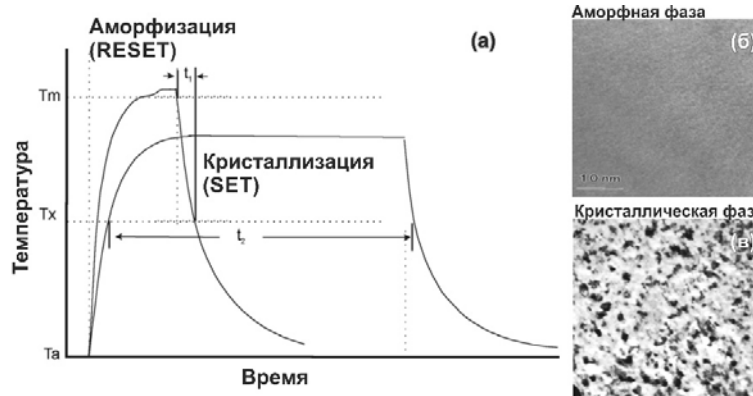


Рис. 11. Принципиальная схема фазовой записи двоичной информации (0 – «RESET» и 1 – «SET») с помощью аморфизации и кристаллизации GST активного слоя выше и ниже температуры плавления, соответственно. Электронное изображение аморфной и кристаллической фазы (б), (в).

три порядка, от 25 Ом·см до 20 мОм·см, соответственно. Рис. 11 (б) показывает электронное изображение поверхности аморфного и кристаллического одно и того же халькогенида [64]. Важно отметить, что в двух состояниях этот материал является полупроводником с близкими значениями запрещенных зон: 0.7 эВ (аморфное состояние) и 0.5 эВ (кристаллическое состояние). Однако энергия активации проводимости отличается уже на два порядка – 0.3 эВ для аморфного состояния и 0.02 – для кристаллического. Аномальная разница обусловлена стохастизацией локализованных электронных состояний аморфного полупроводника и «втягивание» их в запрещенную зону [63]. Другими словами, возникает мобильная запрещенная щель,

в которой носители зарядов скачкообразно движутся через локализованные состояния аморфного полупроводника [63]. В поликристаллическом состоянии вакансии приводят к акцепторным состояниям, которые смещают уровень Ферми в направлении валентной зоны. Дополнительно уменьшение числа ловушек приводит к высокой вырожденной проводимости p -типа. Таким образом, РСМ ячейка работает на основе обратимого изменения дальнедействующего упорядочивания атомов, которое оказывает влияние на положение уровня Ферми и подвижность носителей заряда и, как результат, на электрическое сопротивление. На рисунке 12 (а) показан схематически коммерческий прототип ОУМ ячейки. Механизмы фазового превращения халькогенида при изменении температуры изображены на рис. 12(б).

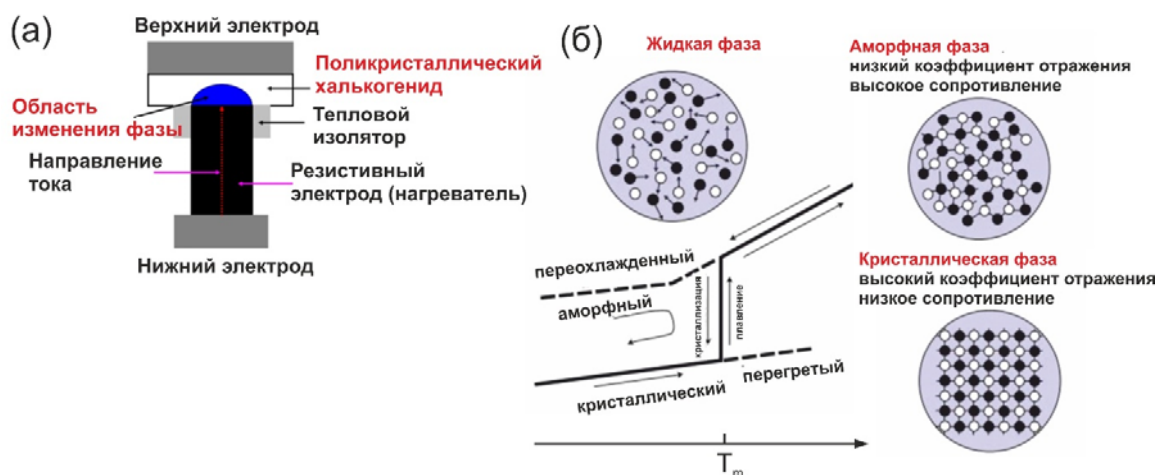


Рис. 12. Принципиальная схема РСМ ячейки ОУМ (а), фазовый переход из кристаллического состояния в аморфное/жидкое и обратно (б).

Нагревание рабочей области, содержащий халькогенид, осуществляется в большинстве случаев с помощью электрического тока. Типичные значения токов составляют 1 мА/бит. Устройство функционирует при температурной диапазоне - 55°C to 125°C. Время программирования (чтения/записи) активного элемента составляет 50-100 нс. Важно отметить, что в общем случае имеет место широкий диапазон сопротивлений, который позволяет реализовать многобитовую архитектуру

записи данных. Однако современные технологии используют в основном одно-битовое программирование. После записи на физическом носителе, информация считывается по измерению электрического сопротивления при низких значениях напряжения.

В перезаписываемых CD и DVD дисках, для нагревания халькогенида и переключения между двумя состояниями используется лазерное излучение [65]. Записанное состояние воспроизводится с помощью лазерного излучения меньшей интенсивности и измеряется коэффициент отражения между двумя фазами.

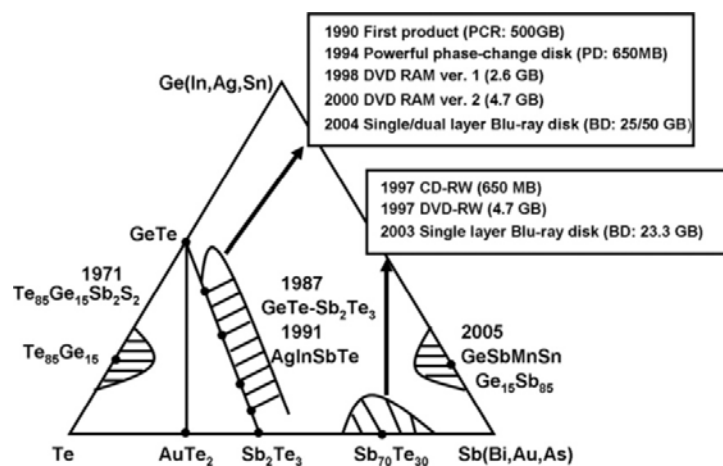


Рис. 13. Схематическая фазовая диаграмма для различных сплавов, используемых в фазовой полупроводниковой памяти.

Наряду с электрическим сопротивлением испытывают резкое изменение спектр поглощения (дихроизм) материала и его показатель преломления (двулучепреломление). Однако эти изменения происходят на больших временах (минуты) и поэтому для целей записи и хранения информации не используются [65]. Тем не менее лазерный свет с круговой поляризацией применяют как дополнительный технологический инструмент контроля фото-индуцированного состояния халькоге-

нидных пленок, связанного с хиральностью. Круговой дихроизм наблюдается в течение десятков наносекунд и может быть использован для кодирования информации [65].

Первыми материалами с быстрой кристаллизацией и хорошим оптическим контрастом были GeTe и $\text{Ge}_{11}\text{Te}_{60}\text{Sn}_4\text{Au}_{25}$ [66-70]. В настоящее время халькогениды делятся на три класса: 1) эвтектические сплавы, содержащие Te, 2) псевдо-бинарные сплавы GeTe-Sb₂Te₃ и 3) эвтектические сплавы, содержащие Sb (см. рис. 13). Первый класс соединений, включающий $\text{Ge}_{15}\text{Te}_{85}$ показывает сильно устойчивое аморфное состояние при комнатной температуре за счет большой скорости рекристаллизации, тогда как псевдо-бинарное семейство GeTe-Sb₂Te₃

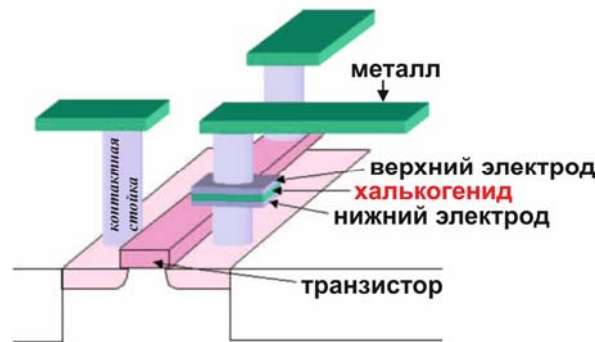


Рис. 14. Интегрирование PCM ячейки и транзистора.

обеспечивает быструю рекристаллизацию и сильный оптический контраст. Важным физическим свойством халькогенидов является аномально большая разница в электрическом сопротивлении между аморфным и кристаллическим состояниями – как правило составляет три порядка. Именно этот класс, включающий $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST 225), GeSbTeN, GeSnSbTe, GeBiSbTe, GeBiTe и GeInSbTe, получил широкую популярность при создании фазовой энергонезависимой полупроводниковой памяти. Однако среди этих композитов GST 225 представляет собой «золотой стандарт» для фазовой записи данных. Эвтектические сплавы на основе Sb, такие как

$\text{In}_x(\text{Sb}_{70}\text{Te}_{30})_{1-x}$ и $\text{Ag}_x \text{In}_y(\text{Sb}_{70}\text{Te}_{30})_{1-x-y}$, используются как быстро переключаемые записывающие среды, в которых кристаллизация начинается на границах между аморфной затравкой и кристаллической матрицей благодаря малой вероятности зародышеобразования допированного SbTe. В отличие от последнего, механизм кристаллизации халькогенидного сплава управляется процессом зародышеобразования – кристаллизация инициализируется с малых неустойчивых кластеров внутри аморфного состояния и быстро достигают критических размеров.

Одной из важных задач является интегрирование полупроводниковой памяти в КМОП транзисторы и металлические контакты без их разрушения. На рис. 14 показана ячейка памяти между двумя электродами, сопряженная с транзистором [63,64]. Работы в этом направлении ведутся почти 15 лет рядом компаний, такими как Ovonyx Inc., BAE SYSTEMS Inc., Space Vehicles Directorate of the Air Force Research Laboratory (AFRL) и другие.

PCM обладает уникальным набором свойств, однако существует ряд проблем при ее использовании. Одной из них, как было отмечено выше, является высокая плотность программируемого тока – более 10^7 А/см². С другой стороны, нагреваемый элемент памяти (см. рис. 12(a)) должен быть большего размера, поэтому стоимость технологического процесса может быть выше, чем у флэш-памяти. При уменьшении характерных размеров элемента до 5-20 нм, возникают такие проблемы как изменение состава халькогенидного материала из-за электромиграции. Последняя приводит к образованию пустот в активном материале, которые ухудшают контакт и увеличивают вероятность потери данных. Возникновение перекрестных помех под действием тепла вызывают мягкий сброс и влияют на срок хранения данных при повышенной температуре. Халькогенидный материал в расплавленном состоянии и ограниченном объеме вступает в реакцию с материалом диэлектрика и электрода. Это может приводить к утечке заряда и отрыву активного материала от электрода при его расширении. Октаэдрическое расположение атомов

в кристаллической решетке (см. рис. 12(б)) вызывает локальные искажения при перезаписи. Важной особенностью таких сплавов является высокая внутренняя концентрация вакантных мест, которые неизбежно повышают энергию кристаллизации. Так, например, удаление атомов Ge или Sb из кристалла GST 225 повышает количество вакантных мест, а возникающие искажения приводят к сильному уменьшению энергии и стабилизации сплавов [71].

Одним из важных параметров любого типа памяти является ее надежность и долговечность. Количественной характеристикой является число циклов перезаписи до появления первой ошибки. По сравнению с популярной флэш-технологией с числом перезаписи 10^6 фазовая память на халькогенидах достигает значений 10^{10} - 10^{13} . Среди прочих преимуществ технологии без-зарядовой энергонезависимой фазовой памяти является масштабируемость. В этом смысле успех внедрения этого типа памяти во многом зависит от возможностей современного литографического оборудования. Кроме того, для создания ячейки памяти не требуется интеграции с кремниевой подложкой, что обеспечивает возможность формирования многослойной тонкопленочной архитектуры, например, на металлических пленках.

В заключении отметим, что быстродействующая и энергонезависимая фазовая резистивная память на основе халькогенидов имеет значительно более низкую себестоимость хранения единицы информации, легко масштабируется – в перспективе до 2-5 нм, и демонстрирует лучшие показатели по скорости и ёмкости записи информации по сравнению обычными флэш-технологиями. По этим причинам ОУМ ячейка и ее аналоги с высокой вероятностью могут вытеснить с рынка записывающих устройств уже активно используемую на практике зарядовую энергонезависимую флэш-память. Эта технология может быть основным драйвером рынка в ближайшие 10-15 лет.

Голографическая память

Принципы голографической памяти активно начали развиваться с момента создания когерентных источников света – лазеров. В конце 60-х годов были созданы первые объемные пропускающие, отражательные и мультиплексные голограммы [72]. Это привело к всплеску публикационной активности в начале 70-х в области создания 3D голографической памяти (см. рис. 3), на которую возлагались большие надежды. К середине 70-х годов 20 века интерес к голографическим системам памяти практически угас, так как не существовало малогабаритных устройств ввода постраничной информации достаточно большого объёма, а также доступных устройств считывания этой информации при восстановлении голограмм. В начале 90-х годов ситуация кардинально изменилась с развитием микроэлектроники, особенно в области создания малогабаритных жидкокристаллических матриц и матриц фотодетекторов на основе ПЗС или КМОП технологий. В частности, группа проф. L. Hesselink (Stanford, USA) разработала впервые технологию многостраничной голографической записи. Фундаментальный вклад в развитие голографической памяти сделали проф. D. Psaltis и проф. F. Mok (Caltech, USA). В 1994 году DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency, США) запустила две государственные программы PRISM (PhotoReactive Information Storage Materials) и HDSS (Holographic Data Storage Systems), которые объединили много компаний и университетов по всему миру. В частности, компания IBM разработала две системы – PRISM, которая измеряет скорость битовых ошибок в разных материалах и оптических конфигурациях; и DEMON – голографическая записывающая платформа, которая тестирует алгоритмы кодирования. В этот же период компания Lucent Technology Inc. разработала новый материал на основе фотореактивного полимера для объемной голографической памяти [15].

Усилия многих исследователей в ведущих университетах и компаниях мира привели к пониманию общих принципов построения голографических систем памяти и были сформулированы основные требования к компонентам таких систем с учетом всех ограничений, которые присущи данному методу. Первые голографические диски формата HVD (от англ. – «Holographic Versatile Disk») были разработаны компанией Maxell Inc. и позволяют записывать до 3.9 ТБ информации на светочувствительном полимерном слое. Для считывания информации с голографического HVD диска используются два лазера с разными длинами волн, зеленый – для считывания данных и красный – для контроля и управления сервоприводом диска. Скорость считывания информации достигает 125 МБ/с. Существуют и альтернативные голографические системы записи и хранения информации. Компания InPhase Inc. (США) разработала голографические диски Tapestry ёмкостью 300 ГБ и скоростью считывания 20 МБ/с, которые несколько больше по размеру, чем диски DVD (диаметр 130 мм, толщина 3.5 мм). В ближайшем будущем компания планирует увеличить ёмкость до 1.6 ТБ. Данные кодируются в двоичном коде и отображаются на жидкокристаллическом (ЖК) модуляторе света, который просвечивается лазерным лучом с длиной волны 405 нм. Прошедший через ЖК модулятор лазерный луч далее фокусируется на голографический регистрирующий материал. Одновременно, в эту же точку фокусируется излучение опорной волны того же лазера. Таким образом, происходит запись голограммы. Для повторной записи на это же место, опорный пучок изменяет свой угол падения за счет наклона зеркала. Производители рассчитывают на высокую стабильность хранения данных (более 50 лет) при многократном считывании.

Однако в настоящее время интерес к голографической памяти в научных кругах снова заметно снизился (см. рис. 3). Это объясняется тем, что несмотря на ожидание успеха голографической технологии записи и хранения данных, до сих пор не удалось создать коммерческий прототип голографической памяти [74].

Основными трудностями на пути решения этой проблемы являются: 1) создание фоточувствительных материалов для записи и 2) сложность и дороговизна используемой оптической системы. Использование светочувствительных материалов для многократной записи приводит со временем к потере их функциональности – голограммы бледнеют, появляются шумы, что отражается на безопасности и целостности записываемых данных. Даже при однократной записи имеет место усадка или искажение прореагировавших со светом областей материала, что приводит к изменениям или потере данных при их воспроизведении. Вторая проблема связана с лазерным источником, в качестве которого необходимо использовать мощные лазеры с низкой расходимостью, поэтому компактные полупроводниковые лазеры не подходят для таких систем.

Оптическая плотность записи информации ограничена дифракционным пределом Аббе, поэтому максимальная плотность записи не может превышать ~ 5 Гб/дм². Разработанные в последнее время гибридные голографические системы позволяют преодолеть этот барьер и реанимировать интерес к этой технологии [6,7,75-77]. В частности, стало возможным достичь рекордные для оптики значения ёмкости ~ 8 Тб/дм² и скорости записи 200 МБ/с. По этой причине продолжается поиск новых возможностей увеличения информационной плотности записи и скорости выборки информации с помощью голографического метода – как наиболее перспективного кандидата на создание высокоэффективной системы записи и хранения информации.

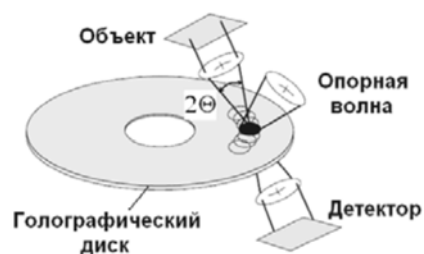


Рис. 15. Принципиальная схема голографической записи.

Голографический принцип записи состоит в регистрации одновременно объектной (несущей информацию об объекте) и опорной (эталонной) волн (см. рис. 15). В результате сложения взаимно когерентных опорной и объектной волн происходит преобразование фазовых соотношений в амплитудную структуру интерференционной картины. Регистрация этой интерференционной картины на голографическом оптическом диске и приводит к записи голограммы. Изменения в материале голографического диска могут быть в виде модуляции поглощения, показателя преломления или толщины. Прогресс в разработке голографических систем хранения информации связан в основном с развитием современных технологий, позволяющих производить относительно дешевые устройства ввода/вывода информации, а также успехами в разработке новых регистрирующих сред для голографической записи. Важной особенностью голографического метода записи является то, что при записи большого числа объектных волн (каждая из которых представляет один бит информации) - они распределяются по всей площади голограммы. Таким образом, повреждение или утрата части голограммы будет приводить лишь к уменьшению уровня сигнала при её считывании, не нарушая при этом целостности картины восстановленных объектных волн. По этой причине, распределенная голографическая запись является принципиально гораздо более устойчивой к появлению каких-либо ошибок или сбоев в канале считывания.

Преимуществами голографической памяти по сравнению с другими (в том числе и оптическими) методами записи/считывания заключаются в следующем: 1) высокая плотность записи (теоретически до ~ 8 Тб/дм²); 2) высокая скорость записи/считывания (~ 200 МБ/с); 3) высокая помехозащищенность записи; 4) возможность реализации алгоритмов поиска данных с использованием свойства ассоциативности голографического метода записи; 5) возможность проведения различных

логических и математических действий, в частности, выполнение параллельных ассоциативных операций, таких, как поиск данных, детектирование изменений, корреляция и распознавание образов между различными массивами; б) запись/чтение данных могут выполняться в режиме реального времени.

Поскольку каждая из голограмм одновременно воспроизводит все записанные в ней данные, это позволяет существенно увеличить не только скорость записи, но и чтение данных с оптического голографического диска. Поэтому, голографические системы памяти могут быть легко интегрированы для взаимодействия с оптическими компьютерами, в которых реализуется принцип параллельности обработки информации. Параллельный доступ ко всей информации, хранящейся в голографическом запоминающем устройстве, делает возможным извлечение полезной информации за время одного периода обращения, то есть существенно уменьшается время считывания. В настоящее время скорость оптического считывания информации в голографических системах памяти достигает 10 Гб/с, а с учетом перевода информации в электронный вид – около 1 Гб/с.

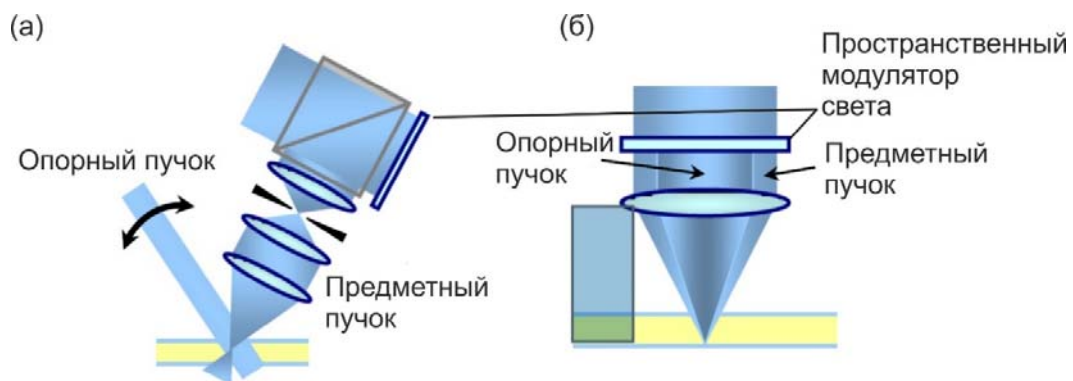


Рис. 16. Угловое мультиплексирование (а), сдвиговое мультиплексирование (б).

Для дальнейшего увеличения плотности записи информации используется принцип мультиплексирования, основанный на записи информации в один и тот же объем. Традиционно, для достижения этой цели используют разные инструменты:

1) изменение угла падения опорного пучка (см. рис. 16 (а)) и 2) изменение его длины волны. В последнее время активно развиваются альтернативные подходы такие как: 1) сдвиговое мультиплексирование (см. рис. 16 (б)) и 2) политопное мультиплексирование [77]. Методы мультиплексирования обычно применяются в сложных оптических системах с использованием толстых (порядка ~ 1 мм) светочувствительных записывающих сред. Часто различные механизмы мультиплексирования комбинируются. Одним из самых эффективных способов увеличения плотности записи данных является голографическое мультиплексирование с динамической апертурой [7], которое представляет собой гибридную технологию, включающую сдвиговую и политопную мультиплексирование. Рис. 17 демонстрирует принципиальную схему монокулярной голографической архитектуры с динамической апертурой (см. рис. 5 (б)).

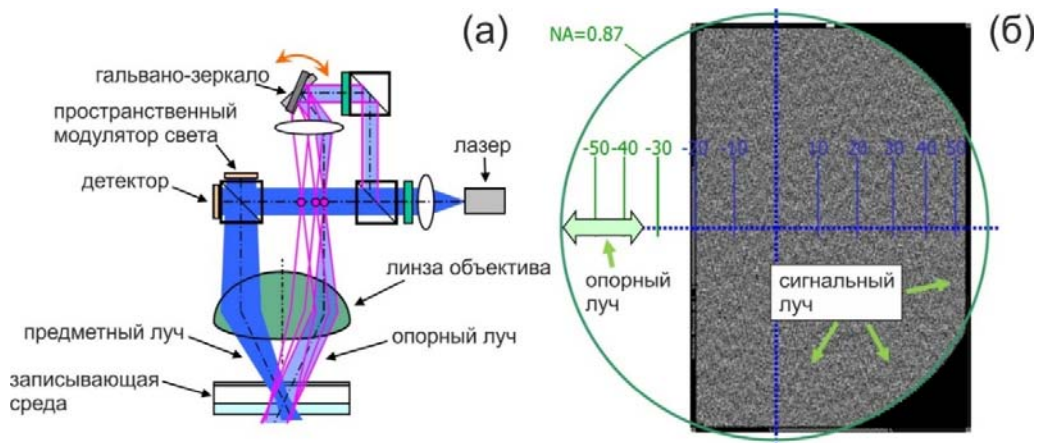


Рис. 17. Принципиальная схема монокулярной голографической записи [7].

Вне-осевая однолучевая конфигурация с угловым мультиплексированием (диапазон углов $\sim 25^\circ$) позволяет записать до 192 голограмм в одном объеме с помощью гальвано-зеркала (см. рис. 17(а)) [7]. Общая ёмкость диска размером 120 мм составляет 700 ГБ. В работе [77] была разработана однолучевая схема на основе углового

мультиплексирования, совместимая с BlueRay Disk, обеспечивая плотности записи 500 Гб/дм². Динамическая апертура позволяет значительно расширить диапазон углов до 100° и, следовательно, увеличить число записываемых голограмм до 1178, обеспечивая ёмкость записи информации ~2+ Тб/дм². В разработку этой технологии Akonia Holographics LLC инвестировала более \$100М. Создаваемая компанией новая платформа голографической записи позволит в ближайшее время достигнуть рекордную ёмкость ~16 Тб/дм², скорость записи 300 МБ/с и время доступа < 50 мс. Такие характеристики приведут к созданию компактных петабитовых голографических дисков диаметром всего 19 дм.

Структура записывающей среды также позволяет улучшить производительность голографической записи. Компании Akonia Holographic LLC, Bell Labs и InPhase Inc. активно внедряют двух-компонентные композиты, состоящей из полимерной матрицы, в которую внедрены свободно перемещающиеся по объёму мономерные звенья. Под действием света полимеризация фиксирует их в матрице и, таким образом записывается информация. Этот подход недавно был успешно модифицирован и получил название DRED («dynamic range enhancing dopant») технологии. Вместо фиксирования путем перепутывания полимеризированных цепочек мономеров ковалентно присоединяются к основной матрице. Такой подход значительно улучшает стабильность записывающей среды и увеличивает время жизни данных. Эта технология одноразовой записи является перспективной для внедрения и масштабирования архивной оптической памяти, которая основана на необратимых фотохимических реакциях [78]. Альтернативными записывающими средами являются фотохромные материалы, в которых наблюдаются фото-индуцированные эффекты дихроизма и двулучепреломления. Такие материалы недороги в изготовлении, и могли бы активно использоваться при коммерческой реализации голографической памяти. Однако в обоих типах материалов могут возникнуть трудности с

воспроизведением информации – так как из-за усадки фотополимерные записывающие среды могут исказить данные, в случае фотохромных материалов – из-за сверхчувствительности к средней локальной интенсивности. Одним из преимуществ является то, что после записи на фотополимере, любые оставшиеся мономеры могут быть утилизированы без ущерба для записанных голограмм.

В настоящее время с помощью лабораторных прототипов систем голографической памяти с использованием в качестве регистрирующей среды полимерного материала достигнута плотность записи до 100 Гб/дм^2 , что примерно в 10 раз превышает значения величин, полученных для побитовой записи на дисках DVD ($\sim 10 \text{ Гб/дм}^2$). Скорость считывания данных постраничной записи достигала при этом 10 Гб/с . Однако в настоящее время, как было отмечено выше, системы голографической памяти не дошли до потребителя по причине своей относительно высокой стоимости и габаритов. Не решены ещё многие проблемы и с системами голографических реверсивных материалов для систем перезаписываемой памяти. Одна из наиболее острых проблем – крайне низкая чувствительность имеющихся в арсенале исследователей фотореактивных материалов. В ближайшей перспективе станет понятно, смогут ли голографические системы памяти в принципе конкурировать с традиционными оптическими, магнитными и полупроводниковыми запоминающими устройствами.

Комбинируя различные механизмы взаимодействия света и вещества, можно реализовать многомодовый режим записи информации, который открывает новые возможности для информационной безопасности. Например, одновременное изменение показателя преломления и поглощения записывающей среды, на основе графенов, обеспечивает многомодовый принцип записи данных (см. рис. 18). Случайный доступ к информации может быть реализован с помощью двух-фотонной записи флуоресценции. Дополнительно, информация может быть зашифрована с помощью голографической записи, которая обеспечивает целостность данных и их

длительное время хранения. Более высокий уровень защиты может быть достигнут путем использования 3D поляризации и лазерных пучков с орбитальным моментом [1]. Весьма перспективной выглядит битовая технология голографической записи на биазобензольной полимерной пленке с помощью фемтосекундного лазера.

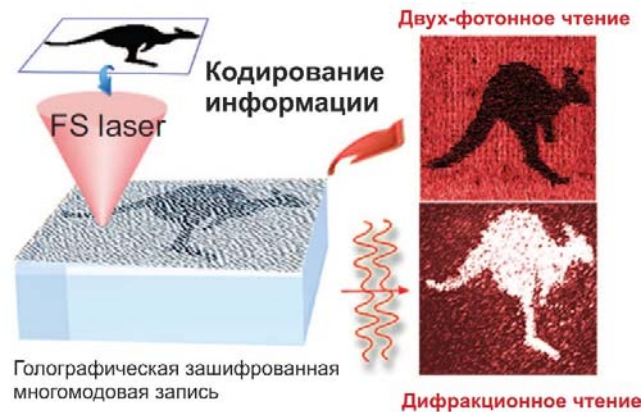


Рис. 18. Голографическая запись в многомодовом режиме с помощью фемтосекундного лазера и чтение информации методами двух-фотонной флуоресценции и дифракционного рассеяния [1].

В заключение отметим, что несмотря на заявления компании Akonia Holographics LLC о создании в скором будущем 3D голографической памяти с ёмкостью ~ 8 Тб/дм², скоростью считывания ~ 200 МВ/с, стоимостью \$10/Тб; случайным временем доступа 30 мс и временем жизни 50 лет; с высокой вероятностью этот вид памяти в отличие от других (в том числе оптических) методов будет использоваться преимущественно в качестве архивной памяти [6,7]. Оптимизм в отношении архивных голографических систем заметно укрепился несколько лет назад благодаря сильному прогрессу элементной базы – прежде всего созданию новых светочувствительных материалов для объёмной голографии, таких как безусадочные фотополимеры от Aprilis и Inphase, а также лазеров, модуляторов, фотопри-

ёмников. В ближайшем будущем основные усилия компаний, специализирующихся на голографической записи данных, будут направлены на разработку и внедрение технологии *квадратурного гомодиного детектирования*, в котором опорный и предметные пучки смещены по фазе на 90° [6,7]. Akonia Holographics LLC планирует удвоить ёмкость существующих голографических носителей благодаря существенному уменьшению сигнал/шум. Другая технология – *фазовое квадратурное голографическое мультиплексирование* – позволяет использовать фазу голограммы для увеличения плотности записи данных, применяя угловое мультиплексирование. Обе технологии, по предварительным оценкам, смогут увеличить скорость записи оптической информации в 4-10 раз. Дальнейшее развитие голографических технологий нацелено на развитие «атомной голографии» (Rewritable 3D Volume Atomic Holographic Optical Storage NanoTechnology, Colossal storage, Inc.), в которой запись осуществляется ультрафиолетовыми лазерами в электрооптических кристаллах [79]. По заявлениям разработчиков планируется достичь фантастической ёмкости записи данных – 600 Тб/дм^2 при скорости передачи 10 Тб/с .

Квантовая память

Квантовая память представляет собой качественно иной способ хранения информации, который отличается от обычной памяти способностью записывать и считывать сигналы, сохраняя их квантовое состояние. Библиометрический анализ публикационной активности в этой области (см. рис. 3) демонстрирует экспоненциальный рост уже на протяжении последних 25 лет. Высокий интерес к новой парадигме памяти основан на возможности революционного, а не эволюционного, как это было ранее; скачка в информационных технологиях и в первую очередь решения проблемы «big data». Несмотря на значительное число предложенных теоретических моделей и разработанных экспериментальных макетов памяти, возможность их практического использования в повседневной жизни остается неопределенной, по крайней мере, в ближайшие 10-20 лет. С другой стороны, решение этой проблемы позволит реализовать одно из величайших достижений человечества – создание квантового компьютера.

Устройства памяти на основе квантовых битов, или кубитов, имеют огромное преимущество перед классическими битами, которые используются в современных компьютерах. Классический бит может принимать только два возможных логических состояния – 0 и 1; кубит, благодаря эффекту квантовой суперпозиции (квантовая система может находиться в двух состояниях одновременно), может принимать не два, а теоретически бесконечное число состояний, например, с помощью поляризации фотона или спина электрона. Этот аспект позволяет с помощью специальных процедур и алгоритмов записывать и считывать с одного квантового регистра (набора кубитов) несравнимо больше данных, чем в случае классического бинарного регистра.

В большинстве существующих концептов квантовой памяти лежит эффект электромагнитно-индуцированной прозрачности (ЭИП) [80-84]. Запись и считыва-

ние квантовой информации осуществляется с помощью световых импульсов. В качестве среды для записи квантовой информации в основном используют [80-82]: 1) «холодные» атомы, 2) однофотонные световые поля, 3) оптические волокна, 4) квантовые точки, 5) фотонные кристаллы.

В качестве кубитов в различных системах хранения квантовой информации могут использоваться как редкоземельные ионы, внедренные в кристаллы, так и частицы атомного пара или охлажденного до температур, близких к абсолютному нулю, атомного газа. Информация на выходе полностью повторяет входящую, вплоть до последнего фотона, создавая трехмерную голограмму, которая может быть считана и обработана. Из-за неизбежной неопределенности, обусловленной законами квантовой механики, часть исходящей информации будет потеряна при измерении, поэтому полученную голограмму можно «прочитать» только однажды, что делает данную технологию идеальной с точки зрения информационной безопасности.

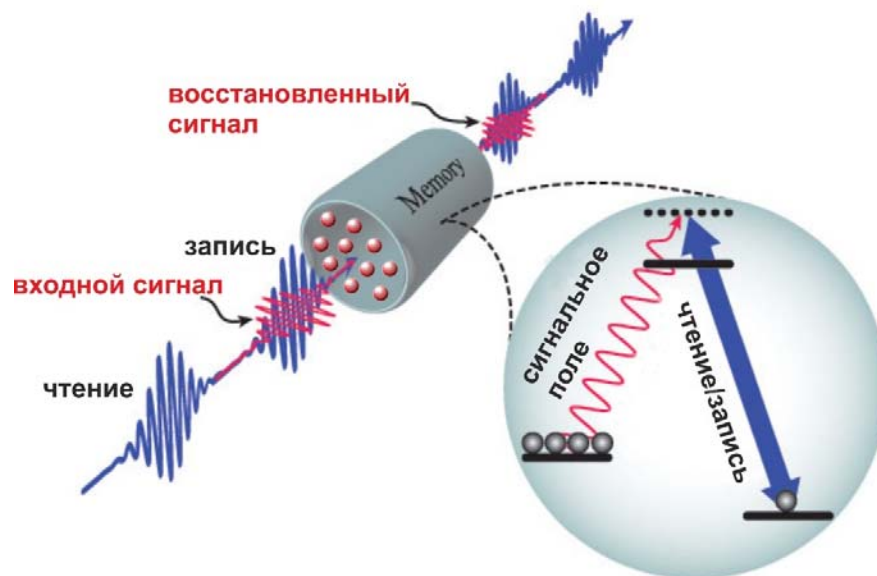


Рис. 19. Принципиальная схема квантовой памяти, основанной на замедлении светового импульса в парах атомов цезия.

В работе [85] разработана концепция оптической памяти с использованием сжатого света, который сохраняется в ячейке с парами рубидия в течение 1 мкс [86]. В 2015 году была анонсирована новая технология квантовой памяти, основанной на комбинационном рассеянии света атомных ансамблей для записи и восстановления многомодового перепутанного состояния оптической гребенки в широком диапазоне длин волн [87]. В том же году французскими физиками был разработан новый вид расслоенной оптической памяти в формате концепта, основанной на взаимодействии света с облаком охлажденных лазером атомов цезия [80] (см. рис. 19). С помощью ЭИП-эффекта, им удалось замедлить световой импульс в тысячу раз по сравнению с его первоначальной скоростью распространения по оптическому волокну. Полная остановка света осуществляется с помощью взаимодействия фотонов и 2000+ ультрахолодных атомов цезия в течение 5 мкс. Возможно прототип этой технологии будет использован в качестве квантовой памяти для создания квантовых сетей и интернета в ближайшие 10 лет.

Альтернативный подход реализации квантовой памяти основан на использовании технологии модифицированного светового эха [88,89]. В качестве носителя информации предлагается макроскопическая система атомов в газе с неоднородно уширенными резонансными оптическими переходами. При этом записываемые квантовые импульсы света отделяются от дополнительных лазерных импульсов света, играющие роль дозаписывающих и восстанавливающих полей. Важным преимуществом предлагаемой техники является разделение во времени «восстановленного» света от исходных лазерных импульсов, что делает ее перспективной при переходе к однофотонным полям. Предложенная идея была теоретически изучена на примере квантового состояния однофотонного волнового пакета. Было найдено аналитическое решение для восстановленной волновой функции фотона и показано, что вероятность восстановления может быть близка к единице. Полученное

решение показало, что восстановленное состояние фотона может приобретать новые свойства, что делает возможным использование предложенной техники светового эха для решения других задач квантовой информатики. Предложенная техника светового эха открывает принципиально новые возможности, как в решении проблемы квантовой памяти, так и в развитии новых методов когерентной квантовой оптической спектроскопии [88]. Преимуществами квантовой памяти на фотонных эхо-сигналах являются высокая скорость и широкая полоса пропускания. За последнее десятилетие изучены механизмы изменения фазы фотонных эхо-сигналов для реализации квантовой памяти и преодоления их фундаментальных ограничений, таких как инверсия и низкая эффективность поиска информации. Хотя эти ограничения были преодолены в модифицированных схемах для фотонного эха, время хранения фотонов все еще слишком мало, чтобы применить его к технологии квантовых коммуникаций.

Группой проф. Калачева А.А. (КФТИ КНЦ РАН, Казань) предложена новая схема оптической квантовой памяти на основе нерезонансного рамановского взаимодействия слабого (однофотонного) светового импульса и сильного контрольного поля в протяжённой многоатомной системе. Показано, что форма слабого оптического импульса может быть записана и воспроизведена с помощью угловой модуляции волнового вектора контрольного поля [91]. Предложенная схема математически эквивалентна оптической квантовой памяти на основе фотонного эха с продольным градиентом неоднородного уширения резонансного перехода, позволяя, таким образом, совместить два подхода: нерезонансное рамановское взаимодействие и градиентное эхо. Разработанный метод, с одной стороны, не требует синхронизации контрольного поля с однофотонным импульсом, а с другой – может быть реализован в системах, которые не позволяют использовать линейный эффект Штарка или Зеемана для управления неоднородным уширением.

Для практического развития квантовых вычислительных систем является важным достижение 50% уровня эффективности хранения информации, тогда как на данный момент самый высокий показатель составляет 45%. Исследователи из Австралийского Национального Университета в работе [91] показали, что эффективность разработанного ими устройства составляет 69% и может быть в дальнейшем увеличена за счет изменения геометрических размеров используемого кристалла. Ключевую роль в хранении информации играют примеси в кристалле — ионы редкоземельного металла празеодима, физические свойства которых позволяют долгое время сохранять квантовое состояние, согласованное с другими ионами, что позволяет реализовать принцип когерентной оптической памяти. Квантовая память позволяет трансформировать квантовую информацию светового излучения на некоторую материальную систему (в данном случае — монокристалл Y_2SiO_5 с редкими включениями ионов празеодима) путем изменения её квантового состояния, оставляя возможность считать эту информацию при необходимости. Чтобы обойти принцип неопределенности Гейзенберга и сохранить информацию неповрежденной, необходимо избежать измерения входного состояния.

В первых экспериментах по демонстрации оптического градиентного эха использовались спектральное выжигание в широких неоднородных линиях $Eu^{3+}: Y_2SiO_5$ [92] и $Pr^{3+}: Y_2SiO_5$ [93], с отстройки градиентом, созданный с использованием линейного сдвига Штарка и градиент электрического поля. Аналогичный эксперимент был выполнен в диапазоне телекоммуникационных длин волн с использованием $Er^{3+}: Y_2SiO_5$ [94]. Так же были предложены схемы реализации квантовой памяти, позволяющие хранить световое поле в ансамбле двухуровневых атомов. Они аналогична методике градиентного эхо-сигнала, но эффективность таких схем порядка 15% [95].

В последнее время квантовая память интенсивно изучается для обработки квантовой информации, особенно для реализации квантовых повторителей в междугородных каналах квантовой связи [96,97]. Чтобы активировать квантовые ретрансляторы, квантовая память должна обеспечить сверхдлинное время хранения фотонов ($\sim 1\text{с}$), с неклассической квантовой точностью – выше 67% [98,99]. Несмотря на интенсивную работу в течение последних десятилетий, получить удовлетворяющие этим требованиям результаты не представляется возможным в силу физики данного процесса. Фундаментальное ограничение времени хранения фотонного эха – фаза и время затухания оптического перехода [100]. Другим ограничением фотонных эхо-сигналов является абсорбция – причина сверхнизкой эффективности извлечения данных [101]. В последнее время некоторые исследовательские группы пытались решить данные проблемы фотонного эха для квантовой памяти [102,103]. В результате, проблема точности поиска и повышения эффективности была решена. Хотя, проблема короткого времени хранения остается нерешенной – время хранения в настоящее время менее миллисекунды в большинстве редкоземельных легированных твердых телах [104]. В газообразных средах, время хранения намного короче, порядка $\sim 1\text{нс}$. [105] В полупроводниках время жизни фотона также ограничено ($\sim 1\text{пс}$) [106].

Теоретически кубит можно сохранить с помощью фотонов, которые изменяют энергетические уровни атомов. Состояние «0» и «1» обеспечивается низкими и высокими уровнями энергии. Однако считывать подобную информацию достаточно сложно – атомы могут просто разойтись или переизлучить фотон, содержащий кубит в случайном направлении. Подобного рода проблемы могут быть решены с использованием не одного, а серии атомов в состоянии конденсата Бозе-Эйнштейна. Jakob Reichel и его коллеги поместили конденсат между двумя зеркалами, представляющими оптический резонатор для света определенной длины волны. Охладить большое количество атомов намного легче, чем одиночные. А в этом состоянии у

них отсутствует тепловое движение, а, следовательно, и дрейф. Таким образом, обеспечивается долгое хранение информации.

Группой проф. И. Соколова из лаборатории квантовой оптики Санкт-Петербургского университета была разработана теоретическая модель квантовой памяти для света, на основе концепции голограммы в квантовой системе [107]. Ученые показали, что теоретически возможно по запросу считать заданную порцию квантовых световых сигналов от голографического изображения, записанные во временной последовательности в заданном направлении и в заданной точке пространства. Для этого следует соответствующим образом сформировать контрольное поле в пространстве и во времени. Кроме того, нужно добиться от квантовых голограмм способности не только сохранять квантовые сигналы, но и считывать изменение их квантовых состояний. Это найдет применение в квантовых коммуникациях и квантовых компьютерах.

Наряду с фотонными эхо-сигналами активно используют спиновый эхо-сигнал [108]. По сравнению с оптическими переходами, спиновые переходы имеют более устойчивые характеристики. В настоящее время интенсивно изучается преобразование когерентности между оптическими и спиновыми состояниями, где время хранения фотонов может быть значительно увеличиваться из-за медленных процессов спин-распада [109,110]. Около десяти лет назад, шведская группа предложила модифицированный метод фотонного эха для продления времени хранения фотонов, а также для повышения эффективности извлечения фотонного эха [102]. Для этого, вспомогательное состояние спина необходимо переместить в оптически возбужденные атомы. Поскольку когерентность может быть непосредственно индуцирована изменением заселенности уровней, ее возможно контролировать. Таким образом, изменение состояния спина может привести к увеличению времени хранения фотонов. В последнее время удалось реализовать расширенную память фотонов с использованием метода преобразования когерентности [111].

Группа исследователей в Мюнхенском университете Людвиг Максимилиана (Германия) исследователей в Ludwig-Maximilians-Universität Мюнхене (Германия) разработала метод перепутывания одиночного атома рубидия 87Rb в оптической ловушке и одиночного фотона путем использования квантовой интерференции пары фотонов на делителе лазерных пучков [112,113]. Исследования в области использования Раман и ЭИП эффектов на щелочных атомах при комнатной температуре с долгоживущей спиновой поляризацией активно проводятся в университете Копенгагена [114 *net*]. Квантовая память на Раман эффекте в атомных газах и твердых телах разрабатывается в Оксфордском университете [115, 116]. Разработка квантовой памяти на NV центрах в кристаллах алмаза активно проводятся в Штутгартском университете [117].

В заключение отметим, что развиваемые в настоящее время экспериментальные проекты находятся на разных стадиях и зачастую их сравнение носит весьма условный характер. Несмотря на бурное развитие квантовой памяти (см. рис. 3), которая в будущем очевидно качественно изменит понятие «информации» и методы ее обработки, сегодня говорить о создании коммерческих прототипов преждевременно. Среди многочисленных разработок особенно следует отметить квантовую память, развиваемую в Университетах Женевы (Швейцария) и Лунда (Швеция), на основе атомных частотных решеток в кристаллах, допированные редко-земельными элементами [118]. На основе этих исследований удалось достичь с высокой воспроизводимостью (~97%) и эффективностью (~1) хранение квантовой информации в течение 30 сек. Эта технология будет востребована при создании источников одиночных фотонов, квантовых повторителей и протоколов, обеспечивающих эффективную редукцию коммуникационной сложности [80]. Пожалуй, единственным сегодня коммерчески оправданным применением квантовых технологий является реализация криптографической системы на основе квантовой телепортации.

Заключение

Несмотря на значительный прогресс в области хранения информации с использованием оптических технологий, по-прежнему лидирующие позиции на рынке занимают жесткие диски и флэш-память. В настоящем пособии флэш-память не рассматривалась, но следует отметить, что перспективы ее развития в среднесрочной перспективе крайне высоки. Это связано с новой технологией интеграции одного транзистора в каждую ячейку трехмерного стека на чипе [1]. Усилия ряда мировых вендоров (Samsung, Intel и др.) направлены на усовершенствование технологии 3D NAND. В 2015 году начала активно развиваться флэш-память, на основе многоуровневой ячейки (MLC), в которую интегрированы четыре области напряжений: 00, 01, 10, 11 [66] и, таким образом, обеспечивает, в отличие от трехуровневой ячейки, удвоенную по плотности запись данных. Тем не менее, рассмотренные выше модификации жестких дисков позволят сохранить лидерство (Seagate, Hitachi, Western Digital) на протяжении еще 3-5 лет благодаря более низкой стоимости хранения единицы информации и длительному сроку службы физического носителя. Более экзотические виды памяти, такие как память на мемристорах и спиновая память (STT-RAM) (см. табл. 4) вряд ли могут претендовать на массовое производство в обозримом будущем, хотя безусловно такие разработки положительно влияют на текущие тренды в создании устройств хранения данных.

Прогресс информационных технологий требует непрерывного увеличения информационной емкости носителей информации и скорости ее обработки. Перспективы повышения информационной емкости оптических дисков связаны с созданием многослойных светочувствительных покрытий для побитовой регистрации информации и толстых (более 2 мм) светочувствительных слоев для голографической регистрации информации. Такие диски могут обеспечить реализацию трехмерной (3D) оптической памяти с плотностью записи более 1 Тб/см² за счет двух-

фотонной записи и воспроизведения информации в различных слоях регистрирующей среды в случае побитовой оптической памяти или под различными углами падения активирующего и восстанавливающего лазерного излучения в случае

Таблица 4.

Сравнительный анализ основных характеристик различных видов памяти [119].

	HDD	Флэш-память	DRAM	Фазовая память	Мемристор	STT-RAM
Площадь чипа на бит, μm^2	н/д	4-8	6-8	8-16	4	14-64
Энергия на бит (пДж) ²	10^5-10^7	10^1-10^4	2-4	2-100	0.1-3	0.1-1
Время чтения (нс)	$5-8 \cdot 10^6$	25000	10-50	20-70	<10	10-30
Время записи (нс)	$5-8 \cdot 10^6$	200000	10-50	50-500	20-30	13-95
Срок эксплуатации	10 лет	10 лет	<1 с	<10 лет	>10 лет	недели
Число циклов перезаписи	10^{15}	10^3-10^5	$>10^{17}$	10^7-10^8	10^{12}	10^{15}
3D совместимость	н/д	да	нет	нет	да	нет

голографической оптической памяти. Разработка таких оптических дисков связана с использованием светочувствительных органических сред, испытывающих фотохимические превращения. Такие среды, в принципе, по сравнению с используемыми в настоящее время термочувствительными материалами обладают более вы-

сокой разрешающей способностью. Потенциальный прорыв в оптических технологиях записи и хранения информации будет связан с трансформационной оптикой и созданием функциональных мета-поверхностей, функционирующих на принципах

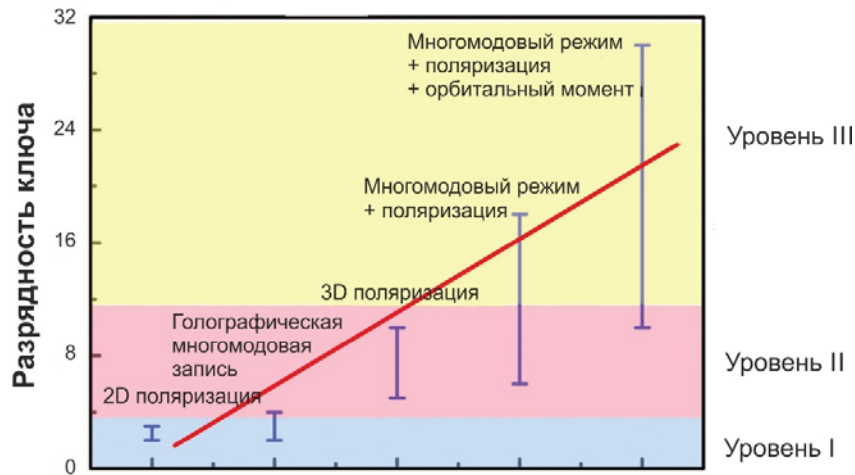


Рис. 20. Уровни криптографической защиты, создаваемой с помощью различных оптических механизмов.

активной плазмоники [120]. Наряду с задачами записи и хранения оптической информации, большое значение имеет информационная безопасность, построенная на принципах оптического взаимодействия. Используя различные свойства лазерного излучения, такие как интенсивность, моды высокого порядка, поляризацию и орбитальный момент можно реализовать криптографические схемы любой сложности (см. рис. 20). Таким образом, рассмотренные в настоящем пособии современные подходы управления светом для хранения данных могут быть эффективно применены в области оптоинформатики.

На сегодняшний день можно сказать, что практическое развитие устройств хранения данных происходит постепенно и эволюционно. Другая картина наблюдается в области фундаментальных исследований физических принципов функци-

онирования памяти, а именно, имеет место взрывной характер предложения концептов, механизмов и моделей. Очевидно большинство из них останутся в «эмбрионе» состоянии, однако их ценность может оказаться

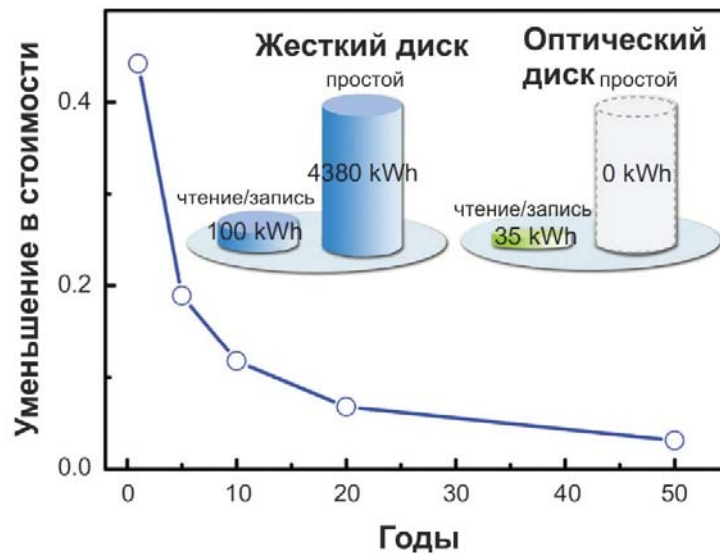


Рис. 21. Зависимость темпа стоимости эксплуатации жёстких и оптических дисков в двух режимах: чтения/записи и «простоя» .

неоспоримой в поиске инновационных решений для энергонезависимой, дешевой, компактной и долговечной памяти. Оптические технологии начинают играть все большую роль в самых разных отраслях экономики. Простой сравнительный анализ между жёсткими и оптическими дисками демонстрируют явные преимущества последних. Например, на чтение/запись в оптических устройствах расходуется на треть меньше мощности по сравнению с жёсткими дисками. В режиме «простоя» оптические диски имеют сильное конкурентное преимущество – они являются энергонезависимыми (см. рис. 21). В таблице 5 показана временная динамика расходования энергии жёсткими и оптическими дисками. Мы наблюдаем значитель-

ную экономию в энергии уже на горизонте 20 лет. Немаловажным фактором является срок службы устройств хранения информации. Оптические диски имеют значительный запас прочности по сравнению с жесткими дисками (см. рис. 22).

Таблица 5.

Сравнительный анализ записывающих сред [6,7].

Годы	2	5	10	20	50	100
HDD (кВтч)	8760	21900	43800	87600	219000	438000
Оптический диск (кВтч)	2628	2628	2628	2628	2628	2628
Экономия энергии	70%	88%	94%	97%	98.8%	99.4%

Благодаря переходу от жестких дисков к оптическим себестоимость хранения записываемой информации может быть уменьшена на два порядка с сегодняшнего \$1 до \$0.01 за 1 Гб. На протяжении двух десятилетий обычные оптические диски (DVD, BlueRay) сформировали гигантский рынок (десятки млрд. долларов в год [1,2,4]) в индустрии развлечений IT-индустрии. Оптическая память нового поколения, благодаря высокой энергоэффективности и большой ёмкости записываемых данных позволит сформировать прорывную технологическую платформу для самых разных отраслей экономики по всему миру. Однако главным драйвером рынка будет выступать ставшая уже актуальной в наше время парадигма «big data», способной капитализировать информационный рынок (связь, хранение, вычисления и безопасность) до 30 млрд. долл. ежегодно [1-4].

Перспективы систем оптической памяти оптической памяти на съёмных носителях приходится выдерживать жёсткую конкуренцию не только с другими формами локального сохранения информации, такими как магнитная и полупроводни-

ковая, но и с относительно новой концепцией распределённого хранения информации, которое становится всё более привлекательным с совершенствованием и широким распространением высокоскоростных сетевых технологий, в том числе беспроводных. Появляются новые технологии хранения информации, такие как «наномеханическая», по идее близкая к архаичной записи информации на перфокартах, но с использованием современной атомно-силовой техники, демонстрирующая очень высокую плотность записи (300 Гб/дм²), правда, при пока низкой скорости в 60 кб/с.

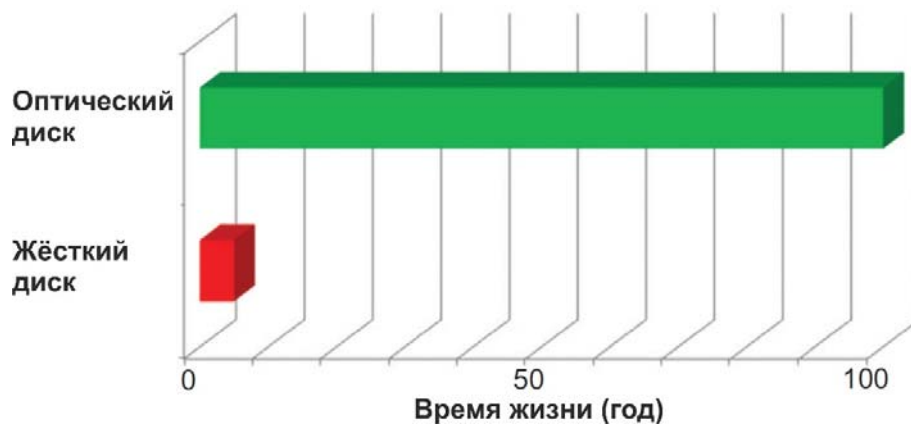


Рис. 22. Зависимость темпа стоимости эксплуатации жёстких и оптических дисков.

По данным аналитического центра Gartner драйвером развития рынка хранения информации выступает азиатско-тихоокеанский регион, который растет в среднем на 5.3 % в год, объем которого достиг в 2015 году почти 5 млрд. долларов [1]. Китай представляет собой самый быстрорастущий рынок в регионе – в 2016 году, по оценкам агентства, он вырастит на 11.7% , Индонезия – на 8.2 % , Сингапур – 4.4 %. В то же самое время Индия будет расти более менее темпами – на уровне 2.1 %. Отрицательную динамику покажет Австралия – -5%, главной причиной спада является переориентация на облачные технологии хранения данных. С точки зрения

глобальной тенденции развития технологий записи и хранения информации ключевые ниши в ближайшие 5 лет будут занимать флэш память для потребительского сектора и HDD память – для расширения инфраструктуры облачных сервисов.

В заключение отметим, что настоящий аналитический обзор не может претендовать на полноту информации по существующим идеям, возможным схемам и реализованным прототипам оптической памяти, поскольку главной целью было выявление наиболее перспективных разработок в этой области, обладающих коммерческим потенциалом с временным горизонтом 10-15 лет.

Список используемой литературы

- [1] Gu M., Li X., Cao Y., *Light: Sci. & App*, 2014, vol. 3, e177. 1-11. 2014.
- [2] Wang L., Yang C., Gai Sh., Wen J., *Current Nanoscience*, 2014, vol. 10, no. 5, pp.638-659.
- [3] J. Toigo, *The Z(ettabyte) apocalypse*, Storage, 2015.
- [4] Milster T., *Proc. of SPIE*, 2014, vol. 9201, no. 92010O, pp. 1-7.
- [5] Bhargava S., *Heat-Assisted Magnetic Recording: Fundamental Limits to Inverse Electromagnetic Design*, EECS Department, University of California, Berkeley, 2015, p.106.
- [6] Anderson K., Ayres M., Sissom B., Askham F., *Proc. of SPIE*, 2014, vol. 9006, no. 90060C, pp. 1-11.
- [7] Anderson K., Ayres M., Askham F., Sissom B., *Proc. of SPIE*, 2014, vol. 9201, no. 920102, pp.1-8.
- [8] Кобаясиб Дж., Уезу Ю., *Оптическая память, принципы записи и используемые материалы АН СССР*, Сиб. отд. Автометрия, №1, 1978, с. 4-16.
- [9] Li H., Wang J., Lin H. , Xu L., Xu W., Wang R., Song Y., Zhu D., *Adv. Mater.*, 2010, vol. 22, no. 12, pp. 1237–1241.
- [10] Chigrinov V., Kwok H., *Proc. of SPIE*, 2007, vol. 6487, no.64870F, pp.1-8.
- [11] Kryder M., Gage E., McDaniel T., Challener W., Rottmayer R., Ju G., Hsia Y., Erden M., *IEEE*, 2008, vol. 96, no.11,pp. 1810-1835.
- [12] <http://nvworld.ru/news/tags/hitachi>
- [13] Hu Y., Ma J., Chen Y., Li J., Huang W., Chu J., *IEEE Photonics Tech. Lett.*, 2013, vol. 26, no. 11, pp. 1041-1135.
- [14] Traven V., Cheptsov D., *Heterocycl. Commun.*, 2015, vol. 21, no. 3, pp. 133–143.
- [15] Heanue J., Bashaw M., Hesselink L., *Science*, 1994, vol. 265. pp.749-753.

- [16] Cokgor I., Mc Cormick F., Dvornikov A., Wang M., Kim N., Koblentz K., Esener S., Rentzepis P., *Proc. SPIE*, 1997, vol. 3109, 182-186.
- [17] Kawata S., Kawata Y., *Chem. Rev.* 2000, vol. 100, pp. 1777-1791.
- [18] Dvornikov A., Cokgor I., Wang M., Mc Cormick F., Esener S., Rentzepis P., *IEEE Transaction. Part A.*, 1997, vol. 20, no. 2, pp. 203-212.
- [19] Dvornikov A., Walker E., Rentzepis P., *J. Phys.Chem.A.*, 2009, vol. 113, no. 49, pp. 13633-13644.
- [20] Ogawa K., *Appl. Sci.*, 2014, vol. 4, no. 1, pp. 1-18.
- [21] Gaspard J., *Solid State Commun.*, 1992, vol. 84, no. 8, pp. 839–842.
- [22] Whittal J., *4n+2 Systems: Fulgides., Photochromism: Molecules and Systems.* (Eds. H. Dürr, H. Bouas-Laurent), 1990, Amsterdam, Elsevier, p. 467–492.
- [23] Barachevsky V., *Ibid*, 1994, vol.246, no.1, pp. 95-102.
- [24] Gilat S., Kawai S., Lehn J.-M., *Ibid*, 1994, vol. 246, no.1, pp. 323 – 326.
- [25] Dvornikov A., Rentzepis P., *Opt. Mem. Neur. Networks*, 1994, vol. 3, pp. 75 -86.
- [26] Geceviius M., Drevinskas R., Beresna M., Kazansky P., *Appl. Phys. Lett.*, 2014, vol. 104, no. 231110, pp 1-4.
- [27] Beresna M., Gecevičius M., Kazansky P., *Opt. Mat. Express*, 2011, vol. 1, no. 4, p. 783.
- [28] Yu N., Genevet P., Kats M., Aieta F., Tetienne J.-Ph., Capasso F., Gaburro Z., *Science*, 2011, vol. 334, no. 6054, p.333.
- [29] Mino T., Saito Y., Verma P., *ACS Nano*, 2014, vol. 8, no. 10, p. 10187.
- [30] Kharintsev S. S., Fishman A. I., Kazarian S. G., Salakhov M. Kh., *Phys. Rev. B.* vol. 92, no. 11, p. 115113-1.
- [31] Di Florio G., Brundermann E., Yadavalli N.S., Santerb S., Havenitha M., *Soft Matter*, 2014, vol. 10, p. 1544.
- [32] Ikeda T., Tsutsumi O., *Science*, 1995, vol. 268, no. 5219, pp. 1873-1873.

- [33] Govind A.S., Suresha B.L., Radhakrishna M.C., *Liquid Crystals*, 2012, vol.39, no. 3, pp. 347–357.
- [34] Garcia-Amor J., Finkelmann H., Velasco D., *Chem. Eur. J.*, 2011, vol. 17, pp. 6518–6523.
- [35] Lucchetti L., Simoni F., *Liq. Cryst. Rev.*, 2015, vol. 3, no. 2, pp. 79-98.
- [36] Lopez D., Rodriguez F.J., Sanchez C., Alcala R., Hvilsted S., *Eu. Polym. J.*, 2006, vol. 42, pp. 3294–3302.
- [37] Bobrovsky A., Shibaev V., Hamplová V., Bubnov A., Novotná V., Kašpar M., Piryazev A., Anokhin D., Ivanov D., *J. of Photochem. and Photobio. A: Chem.*, 2016, vol. 316, pp. 75–87.
- [38] Kharintsev S.S., Fishman A.I., Kazarian S.G., Gabitov I.R., Salakhov M.Kh., *ACS Photonics*, 2014, vol. 1, no. 10, pp. 1025–1032.
- [39] Aktsipetrov O.A., Fedyanin A.A., Melnikov A.V., Mishina E.D., Murzina T.V., *J. Appl. Phys.*, 1998, vol. 37, pp.122-127.
- [40] Rottmayer R.E., Batra S., Buechel D., Challener W. A., Hohlfeld J., Kubota Y., Li L., Lu B., Mihalcea C., Mountfield K., Pelhos K., Peng C., Rausch T., Seigler M. A., Weller D., Yang X. M., *IEEE Trans. on Mag.*, 2006, vol. 42, no. 10, pp. 2417-2421.
- [41] Victora R. H., Wang S., *IEEE Tran. Mag*, 2015, vol. 51, no. 11, pp. 3201307(1-7).
- [42] Ruigrok J. J. M., Coehoorn R., Cumpson S. R., Kesteren H. W., *J. Appl. Phys.*, 2000, vol. 87, no. 9, pp. 5398-5605.
- [43] Wu A. Q., Kubota Y., Klemmer T., Rausch T., Peng C., Peng Y., Karns D., Zhu X., Ding Y., Chang E. K.C., Zhao Y., Zhou H., Gao K., Thiele J.-U., Seigler M., Ju G., Gage E., *IEEE Trans. on Mag.*, 2013, vol. 49, no. 2, pp. 779-783.
- [44] Beschizza R., *Inside Seagate's R&D Labs*, «Wired», 2007.

- [45] Naik G. V., Schroeder J. L., Ni X., Kildishev A.V., Sands T.D., Boltasseva A., *Opt. Mat. Express*, 2012, vol. 2, no. 4, p. 478.
- [46] Bethe H., *Phys. Rev.*, 1944, vol. 66, no. 7, pp. 163–182.
- [47] Betzig E., Trautman J. K., Harris T. D., Weiner J. S., Kostelak R. L., *Science*, 1991, vol. 251, no. 5000, pp. 1468–1470.
- [48] Betzig E., Trautman J. K., Wolfe R., Gyorgy E. M., Finn P. L., Kryder M. H., Chang C.-H., *Appl. Phys. Lett.*, 1992, vol. 61, no. 2, pp.142–144.
- [49] Wang L., Uppuluri S. M., Jin E. X., Xu X., *Nano Lett.*, 2006, vol. 6, no. 3, pp. 361–364.
- [50] Tanaka K., Oumi M., Niwa T., Ichihara S., Mitsuoka Y., Nakajima K., Okhubo T., Hosaka H., Itao K., *Numerical simulation of the near-field optical head with a triangular aperture*, ISOM/ODS Tech. Dig, 2002, p. 320–322.
- [51] Xu J., Xu T., Wang J., Tian Q., *Opt. Eng.*, 2005, vol. 44, no. 1, pp. 018001(1-9).
- [52] Katayama H., Sawamura S., Ogimoto Y., Nakajima J., Kojima K., Ohta K., *J. Magn. Soc. Jpn.*, 1999, vol. 23, no. S1, p. 233.
- [53] <http://hexus.net/tech/news/storage/85769-hamr-hdd-capacities-scale-4tb-2016-100tb-2025/>
- [54] Partovi A., Peale D., Wuttig M., Murray C. A., Zydzik G., Hopkins L., Baldwin K., Hobson W. S., Wynn J., Lopata J., Dhar L., Chichester R., Yeh J. H.-J., *Appl. Phys. Lett.*, 1999, vol. 75, no. 11, pp. 1515–1517.
- [55] Chen F., Itagi A., Bain J. A., Stancil D. D., Schlesinger T. E., Stebounova L., Walker G. C., Akhremitchev B. B., *Appl. Phys. Lett.*, 2003, vol. 83, no. 16, pp. 3245–3247.
- [56] Cubukcu E., Kort E. A., Crozier K. B., Capasso F., *Appl. Phys. Lett.*, 2006, vol. 89, no. 19, pp. 093120(1-3).

- [57] Ueyanagi K., Adachi Y., Suzuki T., Wakabayashi K., Uehara Y., Suzuki T., Moriyasu S., Yamagata Y., Ohmori H., *Jap. J. of App. Phys.*, 2003, vol. 42, no. 2B, pp. 898-903.
- [58] Gokemeijer N. J., Challener W. A., Gage E., Hsia Y.-T., Karns G. Ju, D., Karns D., Li L., Lu B., Pelhos K., Peng C., Rottmayer R. E., Yang X., Zhou H., Rausch T., Seigler M., *Challenges in heat assisted magnetic recording*, MORIS Tech. Dig., Pittsburgh, PA, 2007, p. 1–2.
- [59] <http://news.softpedia.com/news/seagate-reminds-people-that-10tb-drives-are-coming-this-year-491637.shtml>
- [60] Meena J. S., Sze S. M., Chand U., Tseng T.-Y., *Nano. Res. Lett.*, 2014, vol. 9, no. 526, pp. 1-33.
- [61] Kim B., Song Y., Ahn S., Kang Y., Jeong H., Ahn D., Nam S., Jeong G., Chung C., *IEEE*, 2011, vol. 9, pp. 279 - 282.
- [62] Ovshinsky S.R., *Phys. Rev. Lett.*, 1968, vol. 21, no. 20, pp.1450–1453.
- [63] Hudgens S., Johnson B., *MRS Bull*, 2004, vol. 29, no. 11, pp. 829-832.
- [64] Maimon J., Hunt K., Rodgerts J., Burcin L., Knowles K., *AIP Conf. Proc.*, 2003, vol. 699, no. 639, pp. 1-14.
- [65] Borisenko K. B., Shanmugam J., Williams B. A., Ewart P., Gholipour B., Hewak D.W., Hussain R., Javorfi T., Siligardi G., Kirkland A.I., *Sci. Rep.*, 2015, vol. 5, p. 8770.
- [66] Wang L., Yang C.-H., Wen J., *Electron. Mater. Lett.*, 2015, vol. 11, no. 4, pp. 505-543.
- [67] Wong P., Raoux S., Kim S., Liang J., Reifenberg J.P., Rajendran B., Asheghi M., Goodson K. E., *IEEE*, 2010, vol. 98, no. 12, pp. 2201-2228.
- [68] Chen M., Rubin K. A., Barton R. W., *Appl. Phys. Lett.*, 1968, vol. 49, no. 9, pp. 502–504.
- [69] Yamada N., Takenaga M., Takao M., *Proc. SPIE*, 1986, vol. 695, pp. 79–85.

- [70] Ohno E., Yamada N., Kurumizawa T., Kimura K., Takao M., *J. Appl. Phys. Part I*, 1989, vol. 28, no.7, pp. 1235–1240.
- [71] Wuttig M., Lüsebrink D., Wamwangi D., Wełnic W., Gilleven M., Dronskowski R., *Nature Mater.*, 2007, vol. 6, no. 168, pp. 122–128.
- [72] Твердохлеб П.Е., *Голография и оптическая память*, Сборник трудов Всероссийского семинара «Юрий Николаевич Денисюк – основоположник отечественной голографии». – ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 200, с. 65 – 77.
- [73] А. Н. Симонов, А. В. Ларичев, В. И. Шмальгаузен, *Управляемая голографическая запись в пленках азо-содержащих жидкокристаллических полимеров*, Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон., 2000, № 2, стр. 35-39.
- [74] [Ashley J.](#), *IBM Journal of Research and Development*, 2000, vol 44, no. 3, pp. 341 – 368.
- [75] Ayres M. R., Anderson K., Askham F., Sissom B., Urness A. C., *Proc. of SPIE*, 2015, vol. 9386, no. 93860G, pp. 1-7.
- [76] Gu C., *Proc. of SPIE*, 2002, vol. 4929, no. 198, pp. 198-208.
- [77] Shimada K., Ide T., Shimano T., Anderson K., Curtisd K., *Opt.Eng.*, 2014, vol. 53, no. 2, 025102(1-10).
- [78] Sincerbox G.T., *Selected papers on Holographic Storage*, SPIE Milestone Series, SPIE, Bellingham, Wash., 1994, vol. MS 95.
- [79] <http://www.prweb.com/releases/2003/07/prweb72763.htm>
- [80] Simon C., Afzelius M., Appel J., Boyer de la Giroday A., Dewhurst S.J., Gisin N., Hu C.Y., Jelezko F., Kröll S., Muller J.H., Nunn J., Polzik E.S., Rarity J.G., De Riedmatten H., Rosenfeld W., Shields A.J., Sköld N., Stevenson R.M., Thew R., Walmsley I.A., Weber M.C., Weinfurter H., Wrachtrup J., Young R.J., *Eur. Phys. J.*, 2010, vol. 58, pp. 1–22.
- [81] Kurizkia G., Bertetb P., Kubob Y., Mølmerc K., Petrosyand D., Rablf P., Schmiedmayerf J., *PNAS.*, 2014, vol. 112, no. 13, pp. 3866-3873.

- [82] Terhal B. M., *Rev. Mod. Phys.*, vol. 87, pp. 307-347.
- [83] Wootton J. R., *J. Mod. Opt.*, 2012, vol. 59, no. 20, pp. 1717–1738.
- [84] Parigi V., D’Ambrosio V., Arnold C., Marrucci L., Sciarrino F., Laurat J., *Nat. Comm.*, 2015, vol. 6, no. 7706, pp 1-7.
- [85] Appel J., Figueroa E., Korystov D., Lobino M., Lvovsky A. I., *Phys. Rev. Lett.*, 2008, vol. 100, no. 093602, pp. 1-9.
- [86] <http://iqst.ca/quantech/research/sqmemory.php>
- [87] Zheng Z., Mishina O., Treps N., Fabre C., *Phys. Rev. A*, 2015, vol. 91, no. 031802(R), pp.1-10.
- [88] Tittel W., Afzelius M., Chaneliere T., Cone R. L., Kröll S., Moiseev S.A., Sellars M., *Laser & Photon. Rev.*, 2010, vol. 4, no. 2, pp. 244-268.
- [89] Wu M.-X., Wang M.-F., Zheng Y.-Z., *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 2015, vol. 48, no. 155501, pp. 1-7.
- [90] Zhang X., Kalachev A., Kocharovskaya O., *Phys. Rev. A.*, 2013, vol. 87, no. 1, pp. 013811(1-9).
- [91] Hedges M. P., Longdell J. J., Li Y., Sellars M. J., *Nature*, 2010, vol. 465, no. 7301, pp. 1052–1056.
- [92] Alexander A. L., Longdell J. J., Sellars M. J., Manson N. B., *Phys. Rev. Lett.*, 2006, vol. 96, no. 4, pp. 043602(1-7).
- [93] Hetet G., Longdell J. J., Alexander A. L., Lam P. K., Sellars M. J., *Phys. Rev. Lett.*, 2008, vol. 100, no. 2, pp. 023601(1-6).
- [94] Lauritzen B., Minar J., de Riedmatten H., Afzelius M., Sangouard N., Simon C., Gisin N., *Phys. Rev. Lett.*, 2010, vol. 104, no. 8, pp. 080502(1-4).
- [95] Appel J., Figueroa E., Korystov D., Lobino M., Lvovsky A., *Phys. Rev. Lett.*, 2008, vol. 100, no. 9, pp. 093602(1-4).
- [96] Turukhin A. V., Sudarshanam V. S., Shahriar M. S., Musser J. A., Ham B. S., Hemmer P. R., *Phys.Rev.Lett.*, 2002, vol. 88, no. 2, pp. 023602(1-5).

- [97] Liu C., Dutton Z., Behroozi C. H., Hau L. V., *Nature*, 2001, vol. 409, pp. 490–493.
- [98] Duan L. M., Lukin M. D., Cirac J. I., Zoller P., *Nature*, 2001, vol. 414, pp. 413–418.
- [99] Briegel H.-J., Dür W., Cirac J. I., Zoller P., *Phys. Rev. Lett.*, 1998, vol. 81, no. 26, pp. 5932–5935.
- [100] Kurnit N. A., Abella I. D., Hartmann S. R., *Phys. Rev. Lett.*, 1964, vol. 13, no. 19, pp. 567–568.
- [101] Sangouard N., Simon C., Afzelius M., Gisin N., *Phys. Rev. A*, 2007, vol. 75, no. 3, pp. 032327(1-6).
- [102] Moiseev S. A., Kroll S., *Phys. Rev. Lett.*, 2001, vol. 87, no. 17, pp. 173601(1-8).
- [103] Nilsson M., Kroll S., *Opt. Commun.*, 2005, vol. 247, pp. 393–403.
- [104] Macfarlane R. M., Shelby R. M., *Coherent transient and holeburning spectroscopy of rare earth ions in solids, in Spectroscopy of Solids Containing Rare Earth Ions, A. Kaplyanskii and R. M. Macfarlane*, North-Holland, 1987.
- [105] Kim D. S., Shah J., Damen T. C., Schafer W., Jahnke F., Schmitt-Rink S., Kohler K., *Phys. Rev. Lett.*, 1992, vol. 69, no. 18, pp. 2725–2728.
- [106] Hahn E.L., *Phys. Rev.*, 1950, vol. 80, no. 4, pp. 580–594.
- [107] Vetlugin A.N., Sokolov I.V., *Eur. Phys. J. D.*, 2014, vol.108, no. 68, pp 269.
- [108] Ham S., Hahn J., *Opt. Lett.*, 2009, vol. 34, pp. 776–778.
- [109] Boyer V., McCormick C. F., Arimondo E., Lett P. D., *Phys. Rev. Lett.*, 2007, vol. 99, no. 14, 143601(1-4).
- [110] Afzelius M., Usmani I., Amari A., Lauritzen B., Walther A., Simon C., Sangouard N., Minar J., de Riedmatten H., Gisin N., Kröll S., *Phys. Rev. Lett.*, 2010, vol. 104, no. 4, pp. 040503(1-4).
- [111] Hetet G., Longdell J. J., Alexander A. L., Lam P. K., Sellars M. J., *Phys. Rev. Lett.*, 2008, vol. 100, no.2, pp. 023601(1-4).

- [112] J. Volz, Weber M., Schlenk D., Rosenfeld W., Vrana J., Kurtsiefer C., Weinfurter H., *Phys. Rev. Lett.*, 2006, vol. 96, no. 3, pp. 030404(1-4).
- [113] W. Rosenfeld et al., *Phys. Rev. Lett.*, 2008, vol. 101, no. 26, pp. 260403(1-5).
- [114] Kozhekin A.E., Mühlmer K., Polzik E., *Phys. Rev. A*, 2000, vol. 62, no. 3, 033809(1-4).
- [115] Laurat J., Chou C., Deng H., Choi K. S., Felinto D., de Riedmatten H., Kimble H.J., *New J. Phys.*, 2007, vol. 9, no. 207, pp. 1-14.
- [116] Matsukevich D.N., Chaneliere T., Bhattacharya M., Lan S.-Y., Jenkins S.D., Kennedy T.A.B., Kuzmich A., *Phys. Rev. Lett.*, 2005, vol. 95, no.4, pp. 040405(1-5).
- [117] Batalov A., Zierl C., Gaebel T., Neumann P., Chan I.-Y., Balasubramanian G., Hemmer P.R., Jelezko F., Wrachtrup J., *Phys. Rev. Lett.*, 2008, vol. 100, no. 7, pp. 07740(1-4).
- [118] Thiel C.W., Bottger T., Cone R.L., *J. of Lum.*, 2011, vol. 131, pp. 353-361.
- [119] <http://www.zdnet.com/article/the-future-of-storage-2015-and-beyond>
- [120] Zayats A., Maier S. *Active Plasmonics and Tuneable Plasmonic Metamaterials*, 2013, John Wiley & Sons.

Учебное издание

Харинцев Сергей Сергеевич

Оптические методы хранения информации

Подписано в печать 20.03.2016.

Бумага офсетная. Печать цифровая.

Формат 60x84 1/16. Гарнитура «Times New Roman». Усл. печ. л. .

Тираж экз. Заказ

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии Издательства Казанского университета

420008, г. Казань, ул. Профессора Нужина, 1/37

тел. (843) 233-73-59, 233-73-28