



**Конкурс работ молодых ученых «Просто о сложном»
Научно-популярная статья победителя I степени Шахгильдяна
Георгия Юрьевича (к.х.н., ассистент кафедры химической технологии
стекла и ситаллов, РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва)**

Фемтосекунды и нанорешетки на страже ваших данных¹

*Как при помощи современных мощных лазеров и специальных стекол
ученые записывают цифровые данные, которые смогут пережить
наводнение, пожар и даже отправиться в космос*

Человечество хранит информацию уже более десяти тысяч лет, и на протяжении этого времени создает все новые носители информации – от стен пещер и листов папируса, клинописных табличек шумеро-аккадской культуры до магнитных и оптических дисков. Постоянное развитие новых способов записи и хранения информации связано с развитием человечества и созданием все больших объемов информации, увеличение которых идет по экспоненте. Если до середины двадцатого века основными носителями информации были рукописные и печатные издания, объем которых был сопоставим с библиотеками и архивами, то с приходом вычислительных машин и цифровой эры, объемы генерируемой информации каждые несколько лет увеличиваются на порядок, что обуславливает необходимость создания прорывных технологий хранения данных, которые будут обеспечивать потребности информационной индустрии. В то же время, срок сохранности данных на имеющихся носителях ничтожно мал даже в сравнении с печатными книгами или глиняными табличками. Если современным историкам удастся извлечь информацию из найденных рукописей возрастом более тысячи лет, то историкам будущего сделать это в отношении современных носителей данных не удастся. Это обусловлено сохранностью данных на носителе, т.е. возможностью считать информацию без искажения. Средний срок хранения информации на наиболее популярных носителях данных – жестких дисках (HDD/SSD), даже по заявлениям производителей составляет не более пятидесяти лет, на оптических дисках (CD/DVD/Blu-Ray) – не более шестидесяти лет, на ленточных носителях (стримерах), по оптимистичным прогнозам, информация может храниться до ста лет. Таким образом, сохранность информации, требующего архивного хранения на горизонте до 50-100 лет, находится под угрозой. Из этого следует необходимость перманентного резервного копирования информации, что с одной стороны многократно увеличивает стоимость хранения данных, а с другой повышает возможность утери части информации при переносе на новый носитель.

¹ Научно-популярная статья основана на материалах публикаций:

1. Fedotov, S.S., Okhrimchuk, A.G., Lipatiev, A.S., Stepko, A.A., Piyanzina, K.I., Shakhgildyan, G.Y.U., Presniakov, M.Y.U., Glebov, I.S., Lotarev, S.V., Sigaev, V.N. 3-bit writing of information in nanoporous glass by a single sub-microsecond burst of femtosecond pulses (2018) Optics Letters, 43 (4), pp. 851-854.
2. Vetchinnikov, M.P., Lipatiev, A.S., Shakhgildyan, G.Y.U., Golubev, N.V., Ignat'eva, E.S., Fedotov, S.S., Lipateva, T.O., Lotarev, S.V., Vilkovitsky, G.A., Sigaev, V.N. Direct femtosecond laser-induced formation of CdS quantum dots inside silicate glass (2018) Optics Letters, 43 (11), pp. 2519-2522.
3. Lipatiev, A.S., Fedotov, S.S., Okhrimchuk, A.G., Lotarev, S.V., Vasetsky, A.M., Stepko, A.A., Shakhgildyan, G.Y.U., Piyanzina, K.I., Glebov, I.S., Sigaev, V.N. Multilevel data writing in nanoporous glass by a few femtosecond laser pulses (2018) Applied Optics, 57 (4), pp. 978-982.
4. Shakhgildyan, G.Y., Lipatiev, A.S., Vetchinnikov, M.P., Popova, V.V., Lotarev, S.V., Golubev, N.V., Ignat'eva, E.S., Presniakov, M.M., Sigaev, V.N. One-step micro-modification of optical properties in silver-doped zinc phosphate glasses by femtosecond direct laser writing (2018) Journal of Non-Crystalline Solids, 481, pp. 634-642.

Авторы статей: Федотов С.С., Липатьев А.С., Охримчук А.Г., Лотарев С.В., Шахгильдян Г.Ю., Ветчинников М.П., Глебов И.С., Степко А.А., Сигаев В.Н.

Но что будет с имеющимися носителями информации при экстремальных условиях воздействия окружающей среды? Ведь указанные сроки сохранности информации на носителях рассчитаны при нормальных условиях их эксплуатации, в общем случае это температура окружающей среды от 20 до 40°C, влажность не более 40-60% и отсутствие сильных электромагнитных полей. Даже небольшое повышение значений этих параметров приводит к значительному искажению информации на носителях, а экстремальные условия ведут к физическому разрушению самого носителя информации и полной потери данных. Так, магнитное поле с напряженностью более 400 кА/м приводит к размагничиванию современных жестких дисков и потери информации без возможности восстановления, а вследствие бытового пожара в закрытых помещениях (температура до 900-1000°C) физически разрушаются все известные носители информации с полной потерей данных. Описанные проблемы актуальны в первую очередь для архивов и государственных учреждений, имеющих стратегическое значение, когда сохранность информации является доминирующей задачей. И несмотря на обилие носителей информации, присутствующих на рынке, до сих пор не было разработано носителя, решающего подобную задачу.

Таким образом, очевидна глобальная проблема индустрии хранения информации – создание носителя, защищенного от экстремальных условий воздействия внешней среды, с возможностью хранения больших объемов данных в течение длительного срока (более ста лет) без перезаписи.

Ученые РХТУ им. Д.И. Менделеева в течение нескольких лет решили эту задачу, используя принципиально новый подход – мощные фемтосекундные лазеры для записи данных и температурно-устойчивую среду – стекла, для их хранения. Но давайте обо всем по порядку.

Общий принцип подобной записи и считывания информации похож на такой принцип для технологии оптических дисков (CD/DVD) в том, что при помощи «записывающего» лазера в диске записываются точки, хранящие информацию – «питы данных». Затем при помощи считывающего устройства, данные последовательно считываются с диска и передаются на приемное устройство, обрабатываются и поступают в компьютер. Принцип хранения в общем случае заключается в наличие «питы данных» с определенными характеристиками (или его отсутствием) в том или ином месте на пути следования «считывающего» лазера. Таким образом, каждая точка несет в себе одну информационную единицу – бит данных, а считываемая последовательность превращается в длинный код, который затем конвертируется в записанную информацию (текст, изображение, видео и т.п.).

Однако приведенное сходство разработки ученых РХТУ с технологией оптических дисков (CD/DVD) имеет место лишь в общем случае описания. В первую очередь стоит отметить, что особенностью разработки РХТУ является материал носителя информации – это диск из кварцевого или нанопористого стекла, или стекла, содержащего наночастицы серебра или квантовые точки полупроводников. Особенностями кварцевого стекла является его высокая оптическая прозрачность и термостабильность, кварцевое стекло сохраняет все свои свойства при температурах до 1000°C. Стоимость изготовления кварцевого стекла по сравнению с другими оптическими материалами (оптическими кристаллами) в разы ниже, а его производство налажено на ведущих стекольных предприятиях России.

Производства нанопористых стекол и стекол, содержащих наночастицы или квантовые точки, в России нет. Эти стекла были разработаны и синтезированы непосредственно на кафедре химической технологии стекла и ситаллов РХТУ им. Д.И. Менделеева. Нанопористые стекла – это «наногубка» из кварцевого стекла. С губкой нанопористое стекло

объединяет структура, она представляет собой непрерывный каркас из оксида кремния с полостями наноразмеров (порядка 2-10 нм), равномерно распределенных по всему объему стекла. На вид такое стекло прозрачное, однако в силу нанопор обладает рядом свойств, позволяющих быстро записывать в нем информацию. Для синтеза нанопористого стекла сначала варят «обычное стекло», состоящее из оксидов натрия, бора и кремния. Затем это стекло долго отжигают в печах при температуре до 600°C, этот отжиг приводит к тому, внутри стекла происходит фазовое разделение, или «наноликвация» – отдельно собираются нанофазы натрия и бора, а отдельно нанофазы кремния. Такое «наноразделенное» стекло обрабатывают растворами кислоты, что приводит к растворению фазы натрия и бора. А фаза кремния, в силу своей химической стойкости, остается. В результате и образуется «наногубка», где на месте нанофаз натрия и бора возникают нанопоры.

Стекла с наночастицами и квантовыми точками изготовить попроще – для этого при синтезе стекла в его состав добавляют серебро или сульфид кадмия в небольших количествах. После варки эти стекла остаются прозрачными, но в них формируются нанокластеры серебра или сульфида кадмия – маленькие частицы с размерами до 0,5-1 нм. В дальнейшем, когда лазерный пучок разогревает такое стекло, то нанокластеры в зоне разогрева объединяются и образуются уже крупные наночастицы серебра (до 50 нм) или квантовые точки сульфида кадмия (до 30 нм).

Таким образом, понятно, что ученые РХТУ использовали необычные стекла, но остается непонятным, как же можно записать что-то в стекло, даже используя самые мощные лазеры?

За основу методики записи информации был выбран подход, известный как модифицирование структуры стекла под воздействием фемтосекундного лазера. Фемтосекунда это 10⁻¹⁵ с, сложно и даже невозможно представить насколько это быстро. Фемтосекундами описываются скорости движения электронов, а еще ученые смогли создавать лазеры с длительностью импульсов в несколько фемтосекунд. Такие лазеры позволяют фокусировать в узкой точке очень высокую плотность энергии, это приводит к тому, что при фокусировке пучка такого лазера, например, в стекле, начинают протекать «нелинейные» процессы поглощения излучения, то есть мы можем модифицировать структуру материала в его объеме, затрагивая другие области.

Этот принцип позволяет формировать в объеме оптически прозрачных материалов и, в частности, стекол, структуры микронного размера: каналы, волноводы, точки. Ранее было показано, что при определенных параметрах сформированные в стекле точки микронного размера обладают эффектом двулучепреломления. Этот эффект выражается в изменении параметров света, проходящего через такие точки, а именно в сдвиге двух компонент «фаз» света, а также в повороте «медленной оси» двулучепреломления на определенный градус. То есть, во-первых, при прохождении через такую нанорешетку происходит так называемый «фазовый сдвиг» двух составляющих светового пучка с разной поляризацией. Это сдвиг можно количественно измерить и использоваться для кодирования данных. Во-вторых, для кодирования используется поворот «медленной оси», то есть в одной точке можно записывать несколько бит данных. Поэтому ученые приняли решение использовать такие точки с нанорешетками в качестве «питов данных» и хранить в них информацию. В отличие от «обычных питов», которые записываются на одном слое CD/DVD диска (поверхностном слое), «питы с нанорешетками» можно располагать в трехмерном пространстве в объеме стекла, тем самым, создавая слои, содержащие «питы с нанорешетками», что увеличивает объем записываемой информации пропорционально количеству слоев.

Более того, в отличие от «обычных питов», которые могут хранить лишь 1 бит информации (либо точка есть, либо точки нет), «питы с нанорешетками» могут хранить несколько бит (в настоящее время до 4) информации в точке. Это связано с описанным ранее эффектом двулучепреломления в «нанорешетках». В самом простом случае, одна точка с «нанорешетками» может нести количественную информацию о своих параметрах «фазовом сдвиге» и «угле поворота медленной оси», которые задаются в соответствии с параметрами модулятора света, регулирующего лазерный пучок. Каждый из параметров может принимать два значения, к примеру «фазовый сдвиг» принимает значение либо до 20 нм (информационная единица «1»), либо более 30 нм (информационная единица «0»), а «угол» – либо 0° («1»), либо 90° («0»). В таком случае при считывании этого «пита» будет поступать не один, а два бита информации. В более сложных случаях, параметры «нанорешеток» могут принимать большее количество значений, тем самым кодируя в один «пит» 3 или даже 4 бита информации. По предварительным подсчетам даже самый «простой» тип записи информации в «питы с нанорешетками» в несколько слоев позволит записывать не менее 25 Гб информации в диск из стекла диаметром 120 мм со скоростью записи не менее 36 Мбит/с, что эквивалентно Blu-Ray диску, занимающему лидирующие позиции на рынке оптических дисков.

Интересно, что детальные исследования структуры сформированных точек с двулучепреломлением показали, что в кварцевом стекле они состоят из упорядоченных полос, расположенных с периодом в несколько десятков нм. Подобная периодичность расположения полос не является случайной, а повторяется от точки к точке, в результате чего такие упорядоченные структуры, сформированные лазерным излучением и обладающие эффектами двулучепреломления света, стали называть «нанорешетками» по аналогии с дифракционными решетками, которые используются для разложения света в спектр. При этом выяснилось, что в нанопористом стекле такие точки состоят не из нанорешеток, а из крупных полостей, обладающих сильной анизотропией размеров (разницей свойств в разных направлениях), из-за которой возникает эффект двулучепреломления.

А вот в стеклах с наночастицами и квантовыми точками ситуация кардинально другая. Там при воздействии лазерного излучения возникают точки, которые обладают не только эффектом двулучепреломления, но и эффектом люминесценции (излучения света при возбуждении на другой длине волны). Это происходит как раз из-за наночастиц и квантовых точек, которые формируются вокруг точек. Такой двойной эффект можно использовать для еще большего кодирования данных – как в сигнал двулучепреломления, так и в сигнал люминесценции (тогда мы будем задавать сильнее или слабее «светит» наша точка). Физико-химические исследования показали, что в этих стеклах тоже нет как таковых нанорешеток, а двулучепреломление вызвано именно формированием наночастиц в локальном объеме стекла.

Но даже если мы сможем записать информацию такими ухищренными методами, то как ее оттуда считать? Очевидно, что этот вопрос в наибольшей степени актуален для пользователей такой технологии хранения информации. На первых этапах исследования считывание информации с записанного диска осуществлялось в ручном режиме при помощи микроскопа, интегрированного с прибором для количественного изучения параметров двулучепреломления («фазового сдвига» и «угла поворота медленной оси»), в качестве «считывающего лазера» использовался источник с монохроматором. Основной проблемой была необходимость создания принципов автоматического перевода количественных значений параметров двулучепреломления в цифровой вид, (т.е. получение

последовательности битов информации) и дальнейшего восстановления записанных данных (т.е. получения исходных текстов, изображений и т.д.). В результате коллективом был создан комплекс программного обеспечения, выполняющий функции конвертации параметров «нанорешеток», записанных на разных по глубине слоях, в исходные данные. В таком режиме была успешно считана информация, записанная на двадцати слоях из образца стекла.

Сейчас ученые разрабатывают устройство считывания, включающее в себя привод, вращающий диск, синхронизированный с камерой фиксирующей положение диска по вертикали (т.е. фиксирующей слой, на котором в текущий момент времени происходит считывание). Считывание с вращающегося диска на каждом слое должно осуществляться при помощи количественного анализа параметров нанорешеток и синхронизированного с программным обеспечением. При использовании в хранении данных люминесценции наночастиц или квантовых точек, к такому устройству нужно будет также добавлять диодный лазер, который бы возбуждал люминесценцию в точке и детектор, который бы ее улавливал и определял ее интенсивность. С учетом современного уровня техники реализация такого устройства представляется реальной.

Однако главной особенностью «памяти в стекле» является возможность длительного хранения информации и защита от экстремальных условий внешней среды. Проведенные учеными лабораторные исследования термостабильности записанных в дисках нанорешеток показали, что они остаются стабильными и продолжают выполнять «функцию» двулучепреломления даже после длительной термообработки стекла при температуре до 1000°C. Такая температура соответствует сильному бытовому пожару и не один из представленных на рынке носителей информации не выдерживает подобных нагрузок. В результате исследований было установлено, что информация, записанная в диски из кварцевого стекла после выдержки в печи при температуре 1000°C считывается практически без ошибок. В результате моделирования срока архивного хранения данных на дисках было подсчитано, что средний срок хранения информации в дисках из кварцевого стекла при стандартных условиях хранения составит более 100 000 лет без необходимости перезаписи информации, что многократно превосходит все мысленные горизонты планирования. Более того, проведенные испытания по воздействию повышенной влажности, длительном пребывании носителя информации в воде, воздействию сильных магнитных полей не привели к изменениям при считывании информации, что демонстрирует защищенность представленного носителя информации перед агрессивными условиями внешней среды.

Учеными РХТУ была проведена уникальная работа по созданию абсолютно новой технологии записи и хранения информации в носителе с практически неограниченным сроком хранения данных без перезаписи и устойчивостью к агрессивным условиям внешней среды при конкурентоспособном объеме хранения. Эта работа является новой вехой в истории человечества – от папируса к книге, от жесткого диска к диску из стекла. Можно представить, что созданную «память в стекле» можно будет отправлять в космические путешествия и быть уверенным, что данные останутся в сохранности неограниченное большое время. При этом на поверхности диска можно будет нанести информацию о способе ее считывания и ждать, пока одна из развитых цивилизаций найдет наше послание в стекле, прочтет его и возможно выйдет с нами на связь.

Иллюстрации



Рис. 1. Синтез стекол

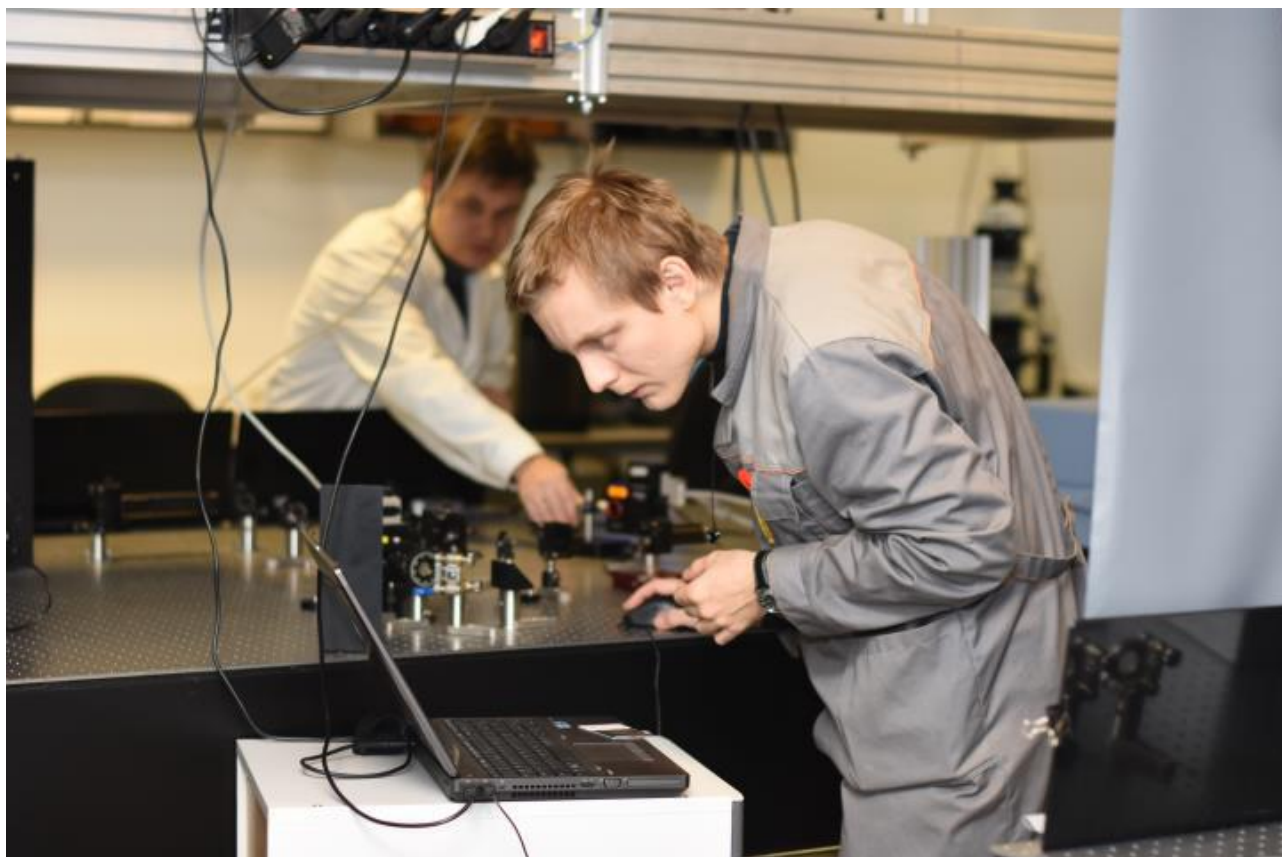


Рис. 2. Подготовка лазера

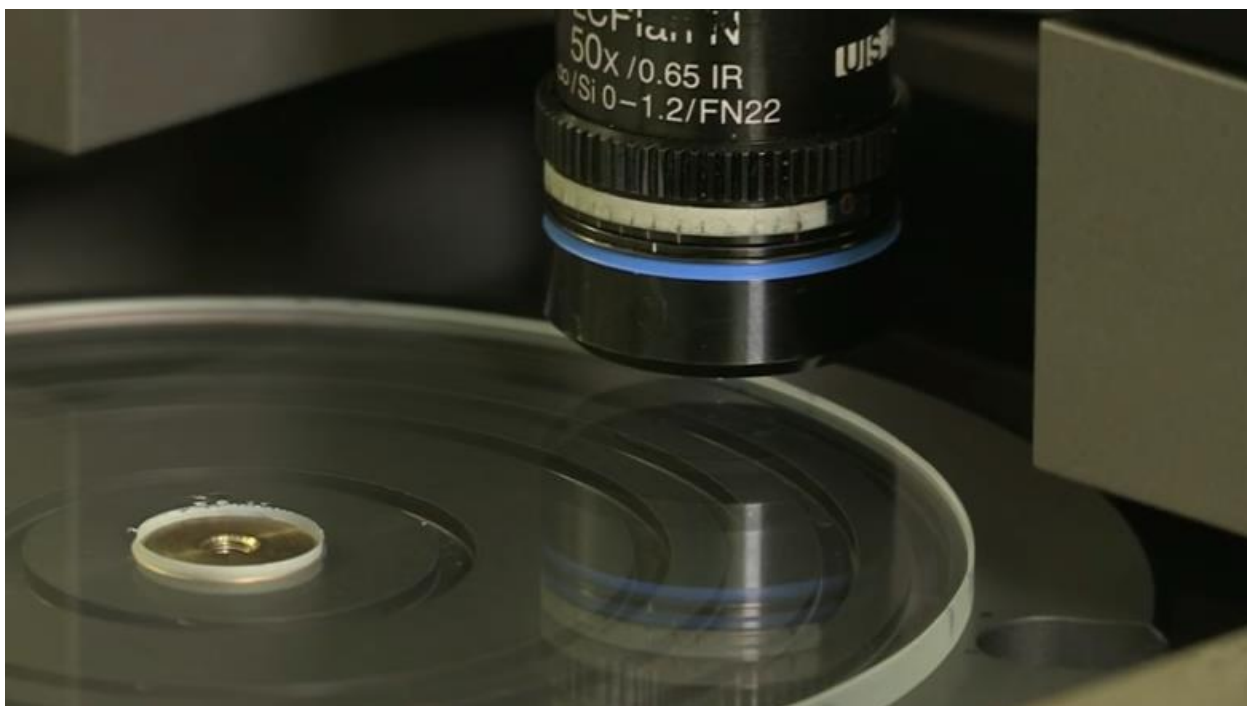


Рис. 3. Запись данных в стекло

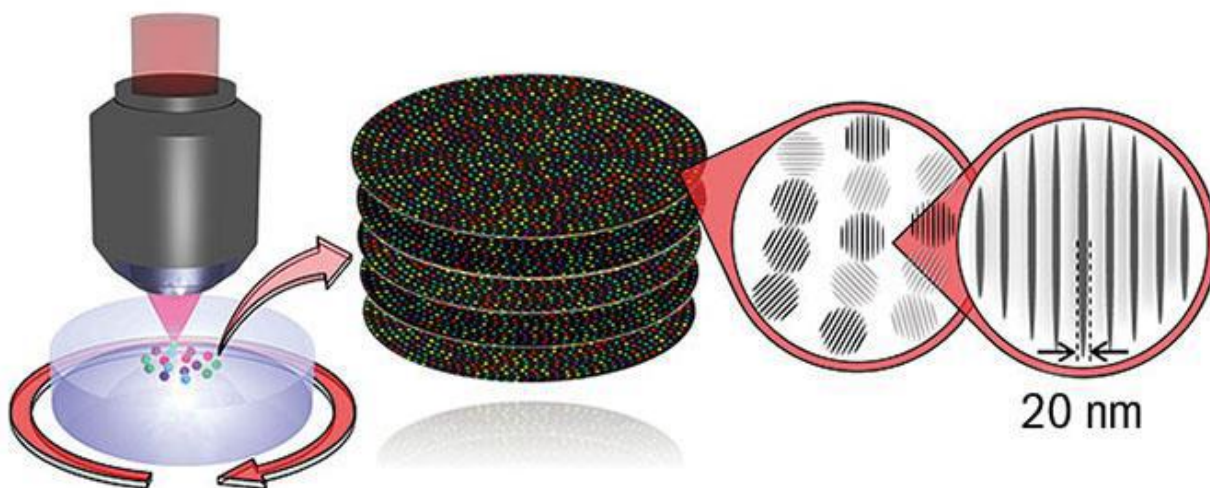


Рис. 4. Схема формирования нанорешеток в стекле

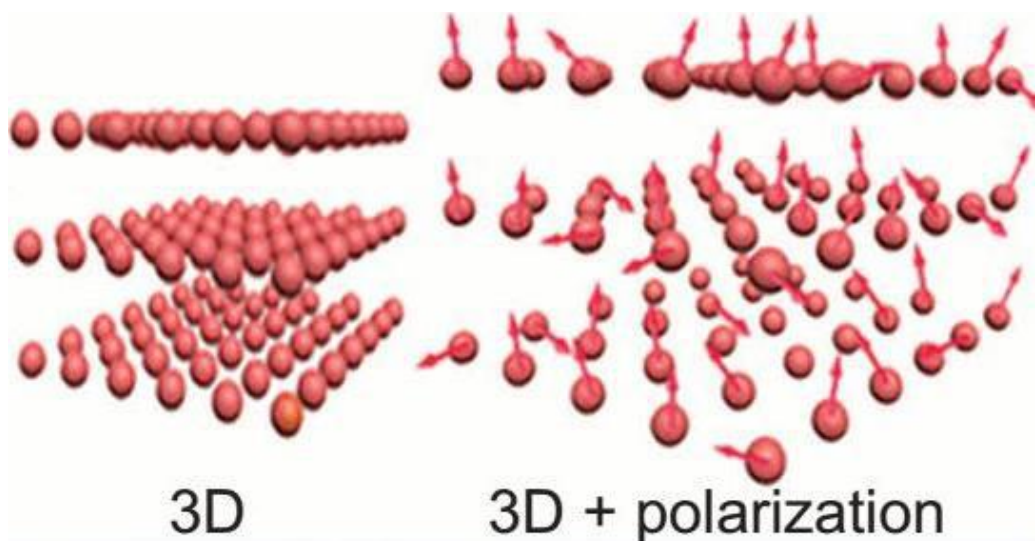


Рис. 5. Схематичное изображение поляризации каждого пита

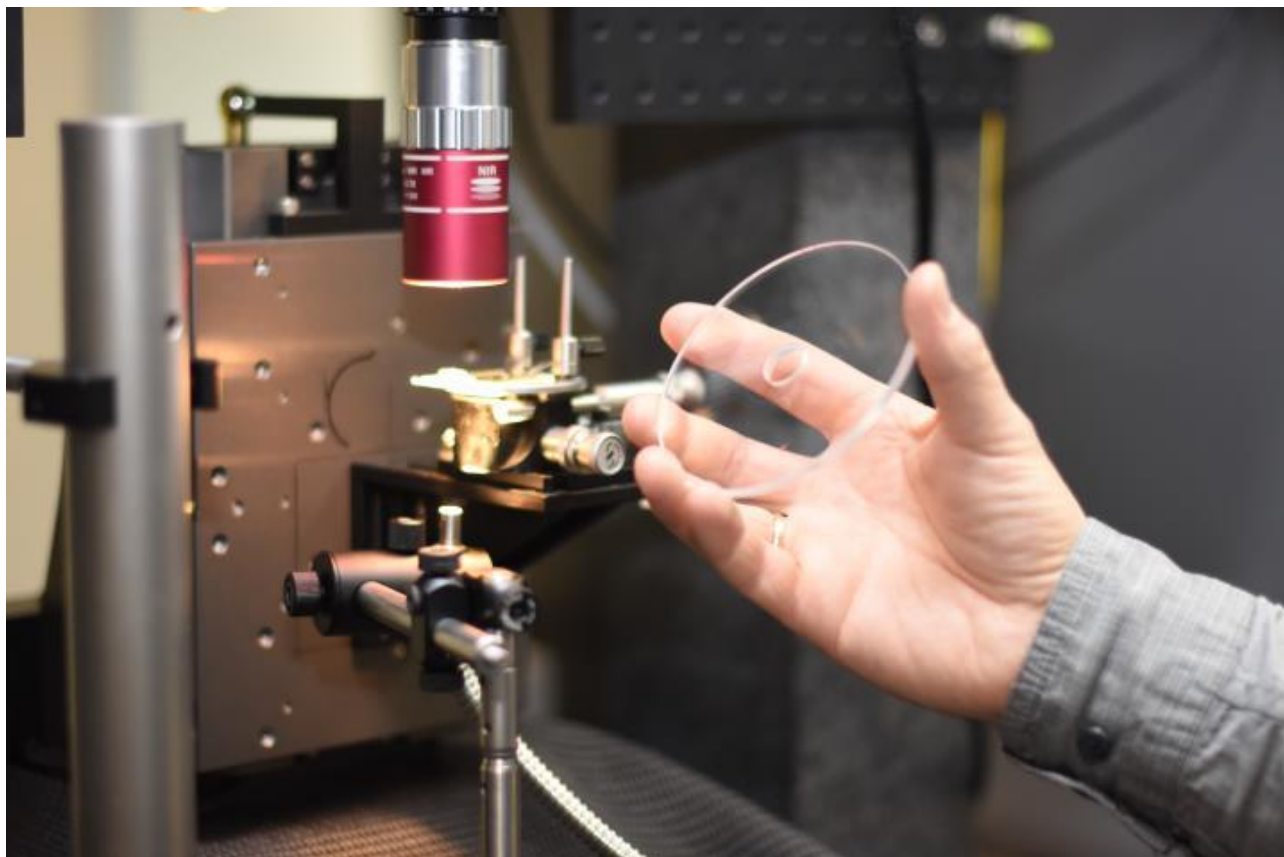


Рис. 6. Изображение стекла с записанными данными