

Стекло как носитель данных на тысячи лет вперед

Арсений Ворошилов, по материалам *phys.org*

Долговременное хранение данных, казалось бы, не вызывает сложностей, но это только на первый взгляд. До настоящего времени, несмотря на широчайший ассортимент различных носителей – магнитных, оптических, электронных – наиболее долговечными, как это ни странно (а может быть, как раз и не странно), оказались совсем простые, изобретенные задолго до цифровой революции, бумага, фото- и киноплёнка. При правильном хранении киноплёнки хранят снятое на них изображение уже более 100 лет. Древние рукописи и книги – еще старше. Одна из причин такого долголетия – эти носители не требуют для считывания информации никаких дополнительных средств, кроме света и человеческого зрения.

Ни один из современных электронных и оптических носителей пока не продемонстрировал чего-то похожего. Даже самые современные SSD в какой-то момент могут перестать распознаваться компьютером, данные с магнитных дисков и LTO-картриджей нужно постоянно проверять на целостность и при необходимости переносить на свежий носитель. Словом, так называемое холодное хранение для таких носителей связано с риском потери данных. Чтобы минимизировать риски, предпринимаются различные меры – дисковые массивы, многочисленные копии одной и той же информации и др.

А что, если речь идет о хранении данных в течение тысяч лет? Какой из современных носителей способен обеспечить такой срок сохранности информации? Этим вопросом задались американские ученые из Microsoft Research и разработали систему под названием Silica, которая записывает информацию на обычную стеклянную пластину и считывает данные с нее. Одна такая пластина может вместить данные, эквивалентные 2 млн книг, будучи сама по размерам сравнима с ладонью человека.

В системе Silica используются экстремально короткие вспышки лазерного света для впечатывания битов информации в брусочек из обычного стекла. Эти импульсы не просто так

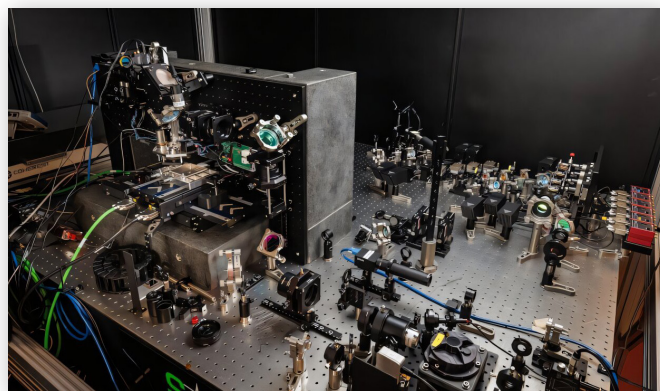
называются ультракороткими. Каждый из них длится примерно квадриллионные доли секунды – они же фемтосекунды или 10^{-15} секунды. Это трудно себе представить – сравнение 10 фемтосекунды с одной минутой равносильно сравнению одной минуты с полным возрастом вселенной. Столь невероятно короткие вспышки могут быть использованы для генерации еще более коротких всплесков света длительностью в аттосекунды – одной тысячной фемтосекунды, или 10^{-18} с.

Эти аттосекундные вспышки можно применять для наблюдения движения электронов внутри атомов и молекул, и в 2023 году Нобелевская премия по физике была вручена за исследования в этой области Ференцу Краусу, Анн Л'Юилье и Пьеру Агостини.

Лазерные фемтосекундные импульсы имеют и практическое технологическое применение. Их можно использовать для внесения изменений внутри прозрачных материалов, таких как стекло. Эти лазеры излучают свет с такой длиной волны, что он обычно проходит сквозь стекло без взаимодействия с ним. Однако, когда ультракороткие импульсы этого счета узко сфокусированы на определенной области, они создают интенсивное электрическое поле, которое меняет молекулярную структуру стекла в месте фокусировки.

Это означает, что только очень малое трехмерное пространство, часто менее одной миллионной метра по стороне, подвергается воздействию. Это пространство называется вокселем, и их можно создать в точно контролируемых точках стекла.

Идея использования формируемых лазером вокселей для трехмерного хранения данных не нова. Эрик Мазур и его коллеги из Гарвардского университета США исследователи волюметрическое оптическое хранение еще в 1990-х годах. Их новаторская работа показала, что постоянные структуры данных могут быть вписаны в обычное стекло с помощью фемтосекундных лазеров.



Исследователи использовали фемтосекундные лазеры для записи данных на стекле в системе Silica (фото Microsoft Research)

В 2014 году Питер Казански и его коллеги из Университета Саутгемптона в Соединенном Королевстве сообщили о хранении данных в плавленом кварцевом стекле с предположительно неограниченным сроком службы. Это помогло появиться идее о возможности создания сверхстабильных устройств памяти на основе стекла.

В 2024 году Казански создал компанию Sphotonix для коммерциализации того, что он с коллегами назвал 5D-наноструктурированием стекла (5D glass nanostructuring). Представление авторов о 5D-кристале памяти даже попало в массовую культуру – похожее устройство появилось в последней части фильма «Миссия невыполнима: Финальная расплата», где оно изображалось как надежное хранилище, способное служить обиталищем мощного, но зловещего искусственного интеллекта.

Проект Silica не претендует на какое-то новое научное открытие. Напротив, коллектив делает первую всеобъемлющую демонстрацию практически применимой технологии. В их работе соединяются все ключевые элементы такой платформы хранения, базирующейся на фемтосекундных лазерах и стекле. Сюда входят кодирование данных, запись, считывание, декодирование и коррекция ошибок. В работе изучаются различные методики достижения надежности, скорости записи, энергоэффективности и плотности данных, также проводится систематическая оценка срока хранения информации.

Для Silica рассматривались два типа записываемых лазером вокселей. Первый состоит из крошечных пустотелых элементов, создаваемых с помощью управляемых лазе-

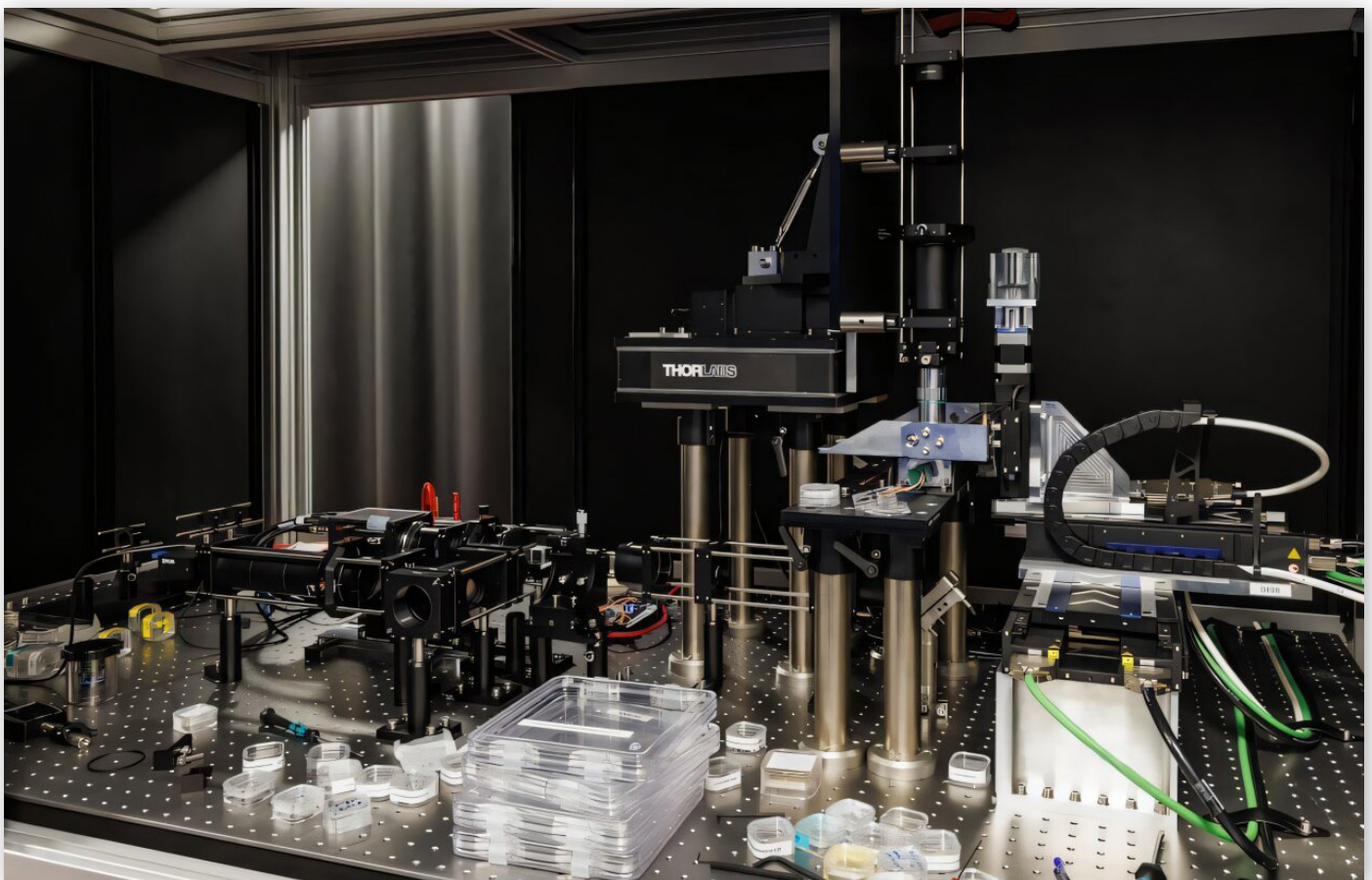
ром «микровзрывов» внутри стекла. Такие воксели обеспечивают высокую плотность хранения в 1,59 Гбит/мм³.

Второй тип предполагает создание мельчайших изменений местного показателя преломления стекла. Такие воксели записываются быстрее и с меньшими затратами энергии, но каждый кубический миллиметр стекла здесь способен хранить меньше данных. По этому методу можно записывать со скоростью примерно 65,9 Мбит/с с возможностью повышения скорости за счет применения большего числа лазерных лучей.

Наконец, эксперименты по ускоренному старению дают основания полагать, что записанные данные, даже в случае с более чувствительными фазовыми вокселями, могут оставаться стабильными в течение 10 тыс. лет и более. Это значительно превосходит срок службы обычных носителей архивного хранения, таких как магнитная лента или жесткие диски.

Каким же видится будущее применительно к средствам длительного хранения данных? В конце 1990-х лишь несколько лабораторий в мире обладали возможностью создавать лазеры, способные генерировать фемтосекундные импульсы.

В настоящее время, после десятилетий технологического развития, ультрабыстрые лазеры, которые обладают надежностью, мощностью и повторяемостью параметров, необходимыми для промышленного применения, можно купить в магазине. Полное, быстрое и энергоэффективное архивное хранение данных является отличным практическим применением для таких лазеров. По мере прогресса в сфере сверхбыстрой фотоники остается все меньше сомнений в том, что появятся и другие варианты ее применения в реальном мире. ■



Система на базе микроскопа используется для считывания информации со стекла (фото Microsoft Research)