

НОВІТНЯ ТЕХНОЛОГІЯ ДОВГОТРИВАЛОГО ЗБЕРІГАННЯ ІНФОРМАЦІЇ НА САПФІРОВИХ ОПТИЧНИХ ДИСКАХ

Стенограма спільної доповіді
академіків НАН України В.В. Петрова
і В.П. Семиноженка на засіданні
Президії НАН України 12 лютого 2014 року

Академик НАН Украины В.В. Петров

Перед человечеством стоит много проблем, важнейшими из которых являются энергетическая проблема, проблема бедности почти половины человечества и, несомненно, целый ряд проблем охраны здоровья. Однако в последнее десятилетие в связи с интенсивным внедрением информатизации во все области деятельности современного общества и, следовательно, переводом информации в цифровой вид возникла очень важная проблема долговременного хранения данных в цифровой форме. До наступления эры информатизации эта проблема не была столь актуальна, так как информация, записанная на бумаге, пергаменте и других носителях, имела срок хранения значительно больше средней продолжительности жизни человека и безболезненно возобновлялась.

Даже 20–30 лет назад, когда компьютерные носители информации имели низкую плотность записи данных и срок хранения информации на них достигал 20–25 лет, эта проблема уже начинала становиться актуальной. Ситуация резко изменилась в связи с тем, что с целью уменьшения стоимости хранения информации в последнее десятилетие плотность записи информации на оптических и особенно на магнитных носителях увеличилась в десятки и сотни раз, что и привело к катастрофическому уменьшению срока хранения информации. Фактически сегодня ни один современный носитель информа-

ции больше чем три-четыре года информацию не хранит. А к чему это приводит?

Представьте себе, что недавно фирма Google закупила 400 тыс. накопителей информации на магнитных дисках для того, чтобы создать память для современной, так называемой облачной системы хранения и обработки данных. И вот через три года они все должны быть заменены. Современный гигант в области информационных технологий, компания Google, может, и выдержит такой темп обновления носителей информации, но миллиарды пользователей персональных компьютеров должны менять все запоминающие устройства в таком же темпе. И самое главное — психология! Ну не может сегодня наш современник имеющиеся у него компьютерные документы, цифровые фотографии и семейные видеосюжеты записать на компьютерный носитель и положить в сейф для своих потомков. Он будет вынужден вытаскивать их и переписывать на новые носители информации. То есть, действительно сложилась катастрофическая ситуация. Создаются гигантские банки данных для централизованного хранения, и в них те же проблемы.

И прежде чем попытаться найти путь к решению этой проблемы, хотелось бы оглянуться, как же все-таки развивались исторические события в области хранения данных. А развивались они очень интересно. Дело в том, что до нас дошли глиняные таблички, которые были собраны в самой древней библиотеке 2700 лет назад. Они сохранились потому, что ассирийский царь Ашшурбанипал создал библиотеку, в которой постарался собрать все знания человечества того времени, накопленные в его родной стране и в окружающих государствах. Записывались эти знания на глиняных табличках, на папирусах, на пергаменте и на восковых табличках для временного хранения. Так вот, сохранилось более 20 тыс. глиняных табличек, а всё остальное истлело. То есть, сохранили информацию только те носители, которые были выполнены из химически стойких материалов (рис. 1). Что такое глина? Глина — это суспензия двуоксида кремния и окиси алюминия, и когда она спекается, то превращается в химиче-

ски стойкую и прочную керамику. Всего до нас дошло около 100 тыс. табличек разных стран и народов, но наиболее древние и интересные из них — это таблички шумеров, датируемые концом III тыс. до н.э. На табличках записано около 12 тыс. произведений, причем есть такие, которые исследователи до сих пор не могут понять. Далеко не все из них опубликованы. Там есть очень интересная информация, например о том, что уже в те далекие времена делались операции по лечению катаракты, описаны уникальные знания в области математики, генетики, об устройстве Солнечной системы. Это пример того, что если мы предпримем усилия для того, чтобы все знания, которыми сегодня обладает человечество, надежно сохранить, то, может быть, они потом дойдут до следующих поколений.

Так на чем же хранить информацию? Таблички шумеров сохранили информацию благодаря тому, что она наносилась в виде рельефа на химически и термически стойкую поверхность табличек из глины. Даже восковые валики Эдисона, на которых по окружности алмазной иглой была записана информация в виде рельефа глубиной всего несколько микрон, все равно сохранили информацию на протяжении вот уже более 100 лет, если они не были поцарапаны или их не съедала плесень из-за плохих

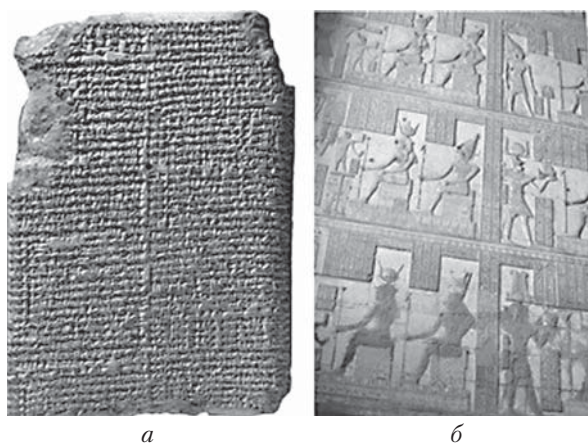


Рис. 1. Хранение информации в древности: *а* — клинописная табличка шумеров с описанием причин разрушения библейских городов Содома и Гоморры, 700 г. до н.э.; *б* — стела храма Рамсеса IV, 1100 г. до н.э.

условий хранения. Таким образом, многократно подтверждается идея, что все-таки лучшим способом хранения информации является ее запись в виде рельефа на однородной поверхности. По такому пути мы и пошли, начав в 1975 г. разработку первого в мире накопителя на оптических дисках. Сегодня этот образец находится в Политехническом музее Украины, он практически на 10 лет опередил компакт-диски и в его конструкции заложены основные физические принципы, которые повсеместно применяются теперь при создании современных оптических дисков. За что сегодня фирма Phillips получает роялти от производителей компакт-дисков? За формат представления данных. А все физические основы были разработаны нами ранее.

Первый диск был изготовлен на подложке из силикатного стекла. Но стекло, хотим мы или нет, щелочное, и какие бы мы ни наносили на поверхность стойкие защитные покрытия, время берет свое, идет коррозия. В Ужгородском научно-технологическом центре материалов оптических носителей информации нашего института синтезированы и исследованы сотни различных материалов для регистрации информации, на которых ее можно хранить 30–50 лет. Но когда идет речь о хранении информации в течение сотен и тысяч лет, необходимо использовать высокопрочные, химически стойкие, жаропрочные, прозрачные материалы для защиты информационного рельефа. Все остальные методы записи (магнитная запись, любой другой рельефный метод, когда информация записывается на открытую поверхность) долговременного хранения не гарантируют.

Быстрое и широкое распространение персональных компьютеров потребовало создания технологии массового распространения больших объемов информации. Для этих целей оказалось востребованным производство оптических дисков (компакт-дисков) методом инжекционного литья из прозрачного поликарбоната. Эта технология позволила решить массу актуальных проблем, однако каждый следующий шаг по увеличению плотности за-

писи данных (DVD, Blu-ray) приводил вместе с увеличением емкости к существенному уменьшению их надежности и уменьшению срока хранения информации. С увеличением плотности записи информации толщина защитного слоя от модели к модели уменьшилась с 1,2 мм для CD до 0,6 мм для DVD и, наконец, до 0,1 мм для оптических дисков Blu-ray.

Сегодня предпринимается много попыток использовать различные герметизирующие и регистрирующие покрытия ради решения проблемы долговременного хранения информации применительно к существующей технологии производства компакт-дисков. Однако в связи с тем, что температура плавления поликарбоната составляет всего 250 °С, а рабочая температура не должна превышать 110 °С, все больше исследователей видит необходимость увеличивать теплостойкость подложки оптических дисков. Разработок много. Опираясь на закон Аррениуса и правило Вант-Гоффа, можно сделать вывод, что наиболее химически стойкими являются высокотемпературные материалы. Среди оптически прозрачных материалов сапфир является самым высокотемпературным и самым твердым после алмаза материалом, обладающим вплоть до высоких температур высокой химической стойкостью как к щелочам, так и к кислотам. Поэтому сапфир необходимо рассматривать как наиболее перспективный материал для создания подложек оптических дисков для долговременного хранения данных (рис. 2).

Важно отметить, что все исследования по созданию систем долговременного хранения информации связаны исключительно с созданием различных типов оптических запоминающих устройств. Разработки осуществляются очень широким фронтом. Сегодня очень широко популяризируется М-диск. Он отличается от стандартного компакт-диска лишь тем, что вместо фталоцианинов в качестве регистрирующего материала используется неорганический многокомпонентный сплав, очень похожий на халькогенидные стекла, которые мы использовали 30 лет назад. Разработчики обещают срок хранения информации тысячу лет,

Правило Вант-Гоффа:				
$\frac{V_2}{V_1} = \gamma \frac{T_{пл2} - T_{пл1}}{10}, \quad T_{пл} - \text{температура плавления материала подложки}, \gamma = 2 - 4$				
Материал подложки	Температура плавления, К	Твердость по Виккерсу, МПа	Относительная температурная стабильность	Температурная стабильность, годы
Поликарбонат	523	130	1	~10
Стекло	923	3 000	$e^{40} = 10^{17}$	~10 ¹⁸
Кварц	1986	10 000	$e^{146} = 10^{63}$	~10 ⁶⁴
Сапфир	2318	22 500	$e^{180} = 10^{78}$	~10 ⁷⁹

Рис. 2. Оценка температурной стабильности подложек оптических дисков

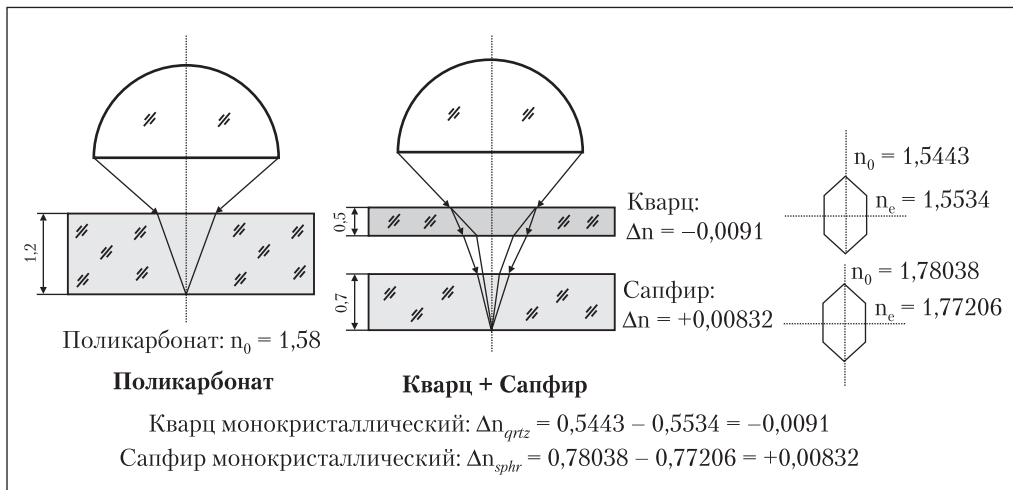


Рис. 3. Компенсация поляризационных aberrаций в сапфировой подложке

но это нереально, потому что поликарбонат из-за низкой температуры плавления достаточно быстро деградирует, и сегодня уже известны микробы, которые разрушают его поверхность.

Очень интересна разработка французов. Для того чтобы хранить информацию о ядерных захоронениях, они предлагают, например, взять два сапфировых диска диаметром 200 мм, внутри нанести информацию на слой платины и затем пластины запаять. Стоимость такого диска с записанной информацией составляет 10 тыс. евро и использоваться они будут, видимо, только для некоторых экзотических

применений. В этой разработке важно то, что в качестве подложки используется сапфир, но не для цифровой, а для проекционной системы представления информации.

Очень интересным является метод записи информации в объеме кварцевой пластины в виде микроповреждений, создаваемых фемтосекундным лазером. Почему-то у них есть надежда, что такие микроповреждения будут сохраняться в кварце миллионы лет. Но даже если и удастся со временем реализовать такую систему, она будет уникальна, будет использоваться в крупных информационных центрах,

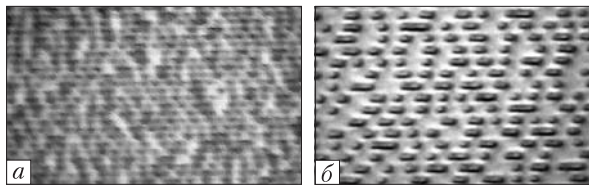


Рис. 4. Качество фокусирования системы: *a* — без компенсирующей поляризационной пластинки; *б* — с применением пластинки

но не для массовых пользователей, которых сегодня значительно больше миллиарда.

Ситуация отчаянная. Если зайти на сайты, особенно американские, обсуждающие проблемы долговременного хранения данных, то там от безысходности предлагают вернуться к хранению цифровых файлов на высококачественной бескислотной бумаге, которая гарантированно может хранить информацию около 200 лет. Между прочим, Алексей Семенович Онищенко нам давно внушил, что если создавать носители для долговременного хранения, то они должны иметь время хранения значительно большее, чем время хранения информации на хорошей бумаге.

В чем же суть нашего подхода к созданию оптических дисков для долговременного хранения информации? Мы долго не могли осуществить высококачественную фокусировку лазерного пучка при прохождении его через сапфировую подложку. Много образцов было изготовлено в Институте монокристаллов, много было проведено экспериментов, пока, наконец, не появилась идея сделать такую оптическую систему, которая создает противоположные по знаку поляризационные искажения и таким образом компенсирует поляризационные искажения сапфировой подложки (рис. 3).

Вот простая иллюстрация (рис. 4). Самая первая фотография сделана без компенсирующей поляризационной пластинки, а другая — с компенсирующей поляризационной пластинкой на сафире. Сразу видно, что изображение существенно улучшается, но это самая первая проба. Мы ее храним как первую историческую фотографию. Таким образом, путь к тому, чтобы использовать самый высокопрочный,

самый высокостабильный материал, который к тому же производится в массовом количестве, открыт.

Теперь уже стоит вопрос: как же такие сапфировые диски использовать? Наверное, самое простое решение состоит в том, чтобы максимально использовать технологические, аппаратные и программные разработки всего семейства сегодняшних компакт-дисков. Очевидно, что производство сапфировых дисков, аналогичных форматам CD-ROM и DVD-ROM, может быть налажено на существующих комплексах по изготовлению дисков-оригиналов компакт-дисков после некоторой их модернизации. Сегодня в мире работает более тысячи таких комплексов, имеющих производительность около 100 дисков в сутки, и переоснащение даже пятой части из них под производство сапфировых дисков позволит организовать выпуск около 10 млн дисков на сафире в год, что может оказаться вполне достаточным для старта производства.

На следующих этапах могут быть адаптированы и технологии, осуществляющие однократную запись (CD-R) и многократную перезапись информации (CD-RW). Применение для этих стандартов сапфировых подложек позволит использовать регистрирующие материалы с более высокими температурами фазовых переходов и существенно увеличить срок хранения информации. Основной физической предпосылкой для этого является увеличение мощности синих полупроводниковых лазеров в десятки раз и существенное улучшение параметров оптических систем.

Важнейшим фактором, определяющим максимальный срок хранения информации, является стойкость металлического отражающего покрытия, которое одновременно выполняет защитные функции. Ответ на многие вопросы стойкости металлических покрытий на поверхности сафира дает комплекс исследований, проведенных в Институте проблем материаловедения под руководством академика Ю.В. Найдича. Показана высокая стойкость пленок ванадия и хрома вплоть до температуры 800°C. Использование платины и родия

может еще больше поднять температурную стойкость отражающего покрытия.

Самый первый оптический диск на сапфире, который мы сделали, это диск диаметром 80 мм и толщиной 0,71 мм. При записи по стандартной технологии CD-ROM на таком диске помещается 210 Мб информации. Дальнейшие наши шаги будут сделаны в создании CD-ROM дисков диаметром 120 мм и емкостью 700 Мб и DVD-ROM дисков емкостью 4,7 Гб (рис. 5).

Что же нужно сделать пользователю, чтобы иметь возможность читать такие диски? В общем-то, к счастью, совсем немного — приклеить кварцевую компенсационную пластинку толщиной 0,5 мм и размером 6×6 мм на объектив считывателя компакт-диска. Это может сделать сам пользователь или же персонал на любой сервисной станции. Вот таким образом возможен быстрый переход на оборудование для работы с сапфировыми дисками.

Мы сомневались, докладывать ли Борису Евгеньевичу об этих результатах. Но когда 25 января этого года Укрпатент после проведения патентного поиска сообщил нам, что аналогов такой системы в мире не существует, мы с Владимиром Петровичем Семиноженко сразу доложили Борису Евгеньевичу Патону, и поэтому доклад в короткий срок был поставлен на заседание Президиума НАН Украины. За это ему большое спасибо.



Рис. 5. Академик В.В. Петров демонстрирует первый в мире оптический диск на сапфире

Когда возник вопрос, что же записать на первый в мире сапфировый оптический диск, мы сразу решили записать на него фонограмму выступления Виктора Михайловича Глушкова на заседании Президиума АН УССР 11 ноября 1976 г. Он выступил с горячей поддержкой нашего совместного с Георгием Евгеньевичем Пуховым доклада по созданию первых в мире накопителей информации на оптических дисках и в дальнейшем активно поддерживал эту разработку.

Спасибо за внимание!

Академик НАН Украины В.П. Семиноженко

В 1998 г. мы с Вячеславом Васильевичем [Петровым] присутствовали на одном из заседаний, на котором выступал посол Соединенных Штатов господин Уильям Грин Миллер. В его выступлении прозвучало, что мы иногда незаслуженно забываем о том, что оптический метод записи информации впервые был предложен здесь, в Украине, в Киеве, но реализовали эту технологию в США. И тогда у нас впервые зародилось, так сказать, желание в чем-то реабилитироваться — ведь это о наших работах шла речь.

Второй эпизод (а их было много) относился к печальному событию 2001 года — это известная трагедия во Всемирном торговом центре в Нью-Йорке. Среди самых масштабных потерь (в первую очередь, конечно, гибель более 2700 человек) была и огромная материальная потеря информации на всех носителях в этих зданиях. Подсчитать и оценить этот ущерб невозможно, то есть он на несколько порядков превосходит стоимость самих зданий. В качестве примера приводят гибель сорока с лишним тысяч негативов фотографий Джона Ф. Кеннеди, снятых личным фотографом президента.

И вот сейчас, когда мы имеем дело с массовым внедрением цифровых технологий в науке, бизнесе и даже в обычных домашних условиях, уже миллиарды людей задумываются над вопросом: как сохранить информацию, например домашний архив? За фото пленки

еще как-то спокойнее, ведь они хранятся лет 50–100, если их не очень сушить, нормально сохранять и, конечно, избегать пожаров. А на любом другом носителе уверенности, что не слетит информация, нет, ведь современные магнитные, оптические и твердотельные накопители хранят ее всего несколько лет. Большие компании переписывают свою служебную информацию. Даже сейчас в облаках все держат информацию с двойным-тройным дублированием, но это огромнейшая головная боль. Я уже не говорю о том, что документацию, содержащую коммерческие секреты, или закрытую информацию в облаках размещать рискованно. Современные технологии дублирования, резервирования и хранения информации на различных носителях могут существенно продлить сроки ее хранения, если температура не превышает 60–80 °С, однако повышение температуры до 100 °С и особенно возникновение пожара приводит к полной потере информации. В мире сегодня широким фронтом ведутся исследования по созданию технологий хранения информации на высокотемпературных носителях, таких как кварц, платиновые и вольфрамовые подложки и т.д.

Вот так и родилась у нас идея: а давайте сделаем аналог оптического диска не на поликарбонате, который совершенно ненадежен по всем параметрам, а на сапфире. Конечно, уникальные физико-технические характеристики сапфира давно привлекают внимание исследователей. Сегодня широко обсуждается технология хранения уникальной информации, предложенная французскими исследователями, когда информация хранится в виде микроизображений на тонкой платиновой пленке, нанесенной на сапфировый диск диаметром 200 мм. По сути это обычная микрофиша на сапфировом диске. Наверное, найдутся важные применения этой технологии, но это возврат к аналоговым технологиям, требующий создания новых достаточно дорогих технических средств, потеря уникальных возможностей, которые дает цифровое представление информации.

Мы же с Вячеславом Васильевичем попытались применить сапфировые оптические ди-

ски в современных цифровых системах хранения информации. А вот как сделать так, чтобы все домашние системы, которые есть у каждого дома или на работе, можно было использовать с минимальной переделкой, чтобы она [технология] была реально применима для широко-масштабного использования? Фактически все эти годы ушли на отработку технологических процессов, которые привели уже к созданию первого в мире цифрового сапфирового оптического диска диаметром 80 мм, который можно установить на любой современный оптический дисковод после очень простой коррекции его оптической схемы. И, конечно же, уже в ближайшее время мы изготовим первую партию сапфировых оптических дисков диаметром 120 мм для проведения испытаний.

Вот почему мы тогда обратились к идее сапфировых дисков. Ведь это уникальный материал, данный нам природой. Он по твердости уступает только алмазу, а по химической стойкости и жаропрочности существенно его превышает. Отличительной особенностью изделий из сапфира является комплекс уникальных свойств для использования их в экстремальных условиях. Сапфир обладает высокой твердостью, химической инертностью, высокой теплопроводностью, прозрачностью в широком спектральном диапазоне, сопротивляемостью термическому растрескиванию, износоустойчивостью, высокой температурой плавления. Он идеально подходит для оптических окон при работе в экстремальных условиях в военной, научной и гражданской сфере использования, где материал работает продолжительное время, не меняя своих свойств.

В настоящее время наиболее широко применяемыми методами выращивания сапфира являются:

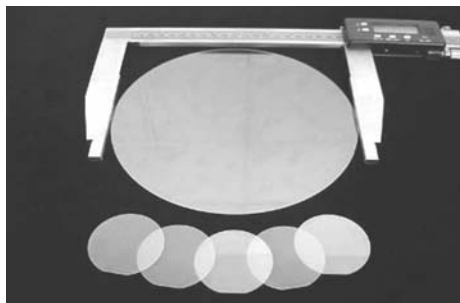
- 1) метод Киропулоса (Rubicon, США; «Монокристалл», Россия);
- 2) метод Степанова (Kyocera, Япония);
- 3) метод теплообмена (GT Advanced Tech, США).

В Украине, в НТК «Институт монокристаллов» НАН Украины, разработана новая технология выращивания больших кристаллов сапфира методом горизонтальной направленной

**РАЗРАБОТАН ПОЛНЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦИКЛ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
САПФИРОВЫХ ПЛАСТИН**

Достигнутые технические характеристики:

- размер $\varnothing 80 \times 0,7$ мм
- плотность дислокаций $< 10^4 \text{ см}^{-2}$
- полуширина кривой качания (FWHM) – 6–9 угл. с
- отсутствие малоугловых границ блоков
- шероховатость поверхности $R_a < 2 \text{ \AA}$
- отклонение рабочей поверхности подложки от кристаллографической плоскости (10–12), (0001) не более 3–5 угл. мин
- оптическая чистота 20/10–80/50 по стандарту USA MIL-0-13830



Сапфировые пластины для оптических носителей информации $\varnothing 80 \times 0,7$ мм

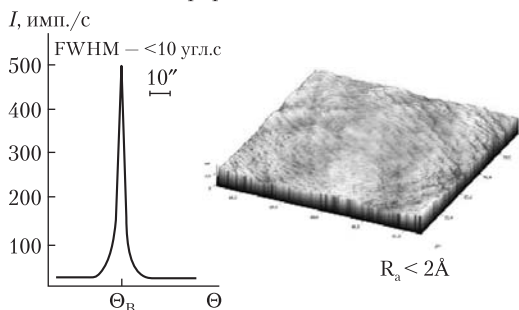
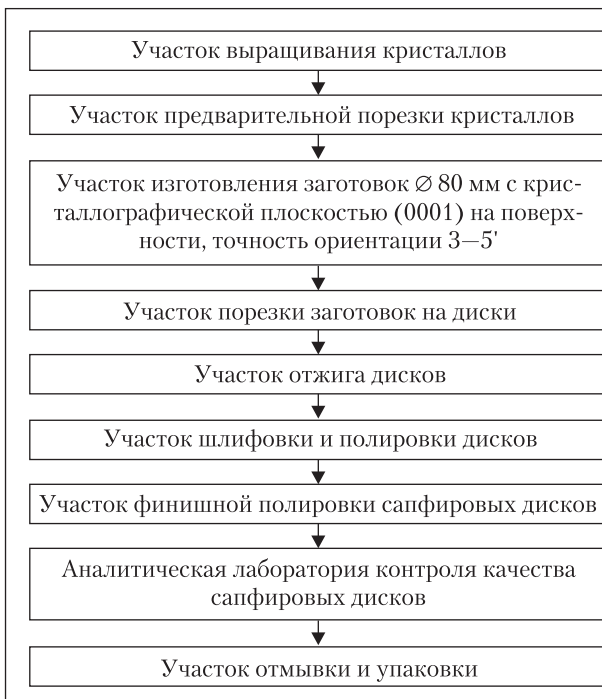


Рис. 6. Сапфировые диски для оптических носителей долговременного хранения информации



Установка химико-механического полирования пластин сапфира «Камертон-500Д-1», разработанная в НТК «ИМК» НАНУ и изготовленная в ЦКБ «Донец»

**СУЩЕСТВУЮЩИЕ МОЩНОСТИ
ОПЫТНОГО ПРОИЗВОДСТВА
ДОСТАТОЧНЫ
ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ДО 20000 ДИСКОВ В ГОД**

Рис. 7. Опытно-промышленный участок изготовления оптических сапфировых дисков

кристаллизации (ГНК) в защитной газовой среде. Данная технология специально была разработана для получения крупных монокристаллов сапфира в форме пластин с высокими оптическими и структурными характеристиками.

Новая технология метода ГНК дает возможность получать кристаллы сапфира высокого оптического качества и структурного совершенства с рекордной толщиной пластин приблизительно 80 мм и габаритами 500×350 мм². Эта разработка позволила также повысить рентабельность производства сапфира и вывести метод ГНК на передовые позиции в мире по экономической эффективности.

Для метода ГНК характерны следующие основные преимущества:

1) высокое оптическое качество и однородность оптических свойств во всем объеме кристалла;

2) возможность выращивания больших монокристаллических пластин сапфира различных кристаллографических ориентаций, в том числе с ориентацией (0001) на поверхности, что невозможно для большинства из перечисленных методов;

3) высокие технико-экономические показатели при выращивании кристаллов и изготовлении из них оптических элементов больших размеров, такие как:

- высокий процент выхода годной продукции (возможность выращивания кристалла под определенный размер изделия);
- использование менее дорогостоящей шихты отечественного производства;
- технологичность и простота кристаллизационного оборудования, а также удобство в порезке и обработке плоских заготовок из выращенных кристаллов.

Очень важным при использовании изделий из сапфира, например в качестве оптических дисков для хранения, распространения и архивирования цифровой информации, является стабильность его характеристик во времени, оптическое и структурное качество материала, а также качество обработки поверхности. Поэтому этим свойствам сапфировых изделий уделяется особое внимание.

Разработан полный технологический цикл изготовления сапфировых пластин различных размеров. При использовании сапфировых пластин в качестве оптических носителей информации к функциональной поверхности сапфира предъявляются жесткие технические требования: отсутствие нарушенного приповерхностного слоя и поверхностных дефектов, низкий уровень шероховатости рабочей поверхности — поверхность должна быть зеркально отполирована. Изготавливаемые в настоящий момент и прошедшие испытания сапфировые диски удовлетворяют необходимым требованиям и имеют следующие технические характеристики (см. рис. 6).

В институте создан опытно-промышленный участок изготовления оптических сапфировых дисков. Производственный цикл представляет собой многостадийное производство, начиная от роста сапфира и заканчивая получением готовых оптических дисков (рис. 7).

Благодаря широкому фронту исследований институтов НАН Украины мы имеем практически весь набор высоких технологий для создания в кратчайший срок чрезвычайно важного для современной информатики продукта, которым являются сапфировые оптические диски для долговременного хранения информации. К такой информации, в первую очередь, относится весь спектр фундаментальных научных знаний, накопленных человечеством: научная информация о земле, генетическая информация существующего биологического мира и многое другое. Таким образом проведенные исследования создают возможность долговременного сохранения информации в цифровой форме как для современников, так и для наших далеких потомков.

Благодарю за внимание.

От редакции: Интерес к этой работе в мире настолько велик, что интервью академिका НАН Украины В.В. Петрова «Сапфировая вселенная», опубликованное в газете «Зеркало недели» 15 февраля 2014 года, в течение 5 дней было процитировано на 76400 сайтах мира.