

Національна академія наук України

ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ РЕЄСТРАЦІЇ ІНФОРМАЦІЇ

САПФІРОВІ ДИСКИ
ДЛЯ ДОВГОСТРОКОВОГО
ЗБЕРІГАННЯ ДАНИХ

Київ 2020

УДК 004.85

Рекомендовано до друку Вченою радою
Інституту проблем реєстрації інформації НАН України
(протокол № 12 від 15 грудня 2020 р.)

Сапфірові диски для довгострокового зберігання даних. Збірник наукових праць. Київ : Інститут проблем реєстрації інформації НАН України, 2020. 152 с. : іл.

ISBN 978-966-02 9504-9

Видання містить вибрані статті та патенти надруковані у період з 2005–2020 рр., в яких представлені результати наукових досліджень з створення оптичних носіїв довгострокового зберігання даних.

Для фахівців в галузі інформаційних технологій, викладачів та студентів відповідного фаху, а також для усіх, хто цікавиться методами довгострокового зберігання даних.

ISBN 978-966-02 9504-9

© Інститут проблем реєстрації
інформації НАН України, 2020

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП | 5 |
| Gorbov I. V., Petrov V. V., Kryuchyn A. A. Using ion beams for creation of nanostructures on the surface of high-stable materials | 7 |
| Петров В. В., Пузиков В. М., Крючин А. А., Горбов И. В. Оптические диски для долговременного хранения информации | 12 |
| Petrov V. V., Kryuchyn A. A., Gorbov I. V. High-density optical disks for long-term information storage | 21 |
| Петров В. В. 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 р. | 33 |
| Petrov V. V., Kryuchyn A. A., Shanoilo S. M., Lapchuk A. S., Morozov Y. M. Sapphire optical discs for long term data storage | 46 |
| Petrov V. V., Semynozhenko V. P., Puzikov V. M., Kryuchyn A. A., Lapchuk A.S., Morozov Ye. M., Borodin Y. O., Shyhovets O. V., Shanoylo S. M. Method of aberration compensation in sapphire optical discs for the long term data storage | 60 |
| Petrov V. V., Semynozhenko V. P., Puzikov V. M., Kryuchyn A. A., Lapchuk A. S., Shanoylo S. M., Morozov Ye. M., Kosyak I. V., Borodin Yu. O., Gorbov I. V. Readout optical system of sapphire disks intended for long-term data storage | 72 |

| | |
|---|-----|
| Petrov V. V., Kryuchyn A. A., Lapchuk A. S., Gorbov I. V., Manko D. Yu., Minglei Fu, Shanoylo S.M., Morozov Ye. M. Long-term data preservation on sapphire optical discs | 82 |
| Петров В. В., Крючин А. А., Шанойло С. М. Оптические носители долговременного хранения информации | 89 |
| Петров В. В., Крючин А. А. Перспективи використання оптичних носіїв для зберігання цифрових електронних ресурсів. | 98 |
| Петров В. В., Крючин А. А., Шанойло С. М., Беляк Є. В., Мельник О. Г. Технології створення оптичних носіїв для систем довготермінового зберігання даних | 105 |
| Petrov V. V., Kryuchyn A. A., Belyak E. V., Shikhovets A. V. Analysis of methods for creating media for long-term data storage | 119 |
| ПАТЕНТИ | 129 |

ВСТУП

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України (ІПРІ НАНУ) спеціалізується на фізичних принципах та технологіях оптичного запису інформації. ІПРІ НАНУ був першим українським науково-технічним центром, який запропонував модель довгострокового оптичного зберігання цифрової інформації на спеціальних монокристалічних носіях.

Основною метою досліджень Інституту є розробка оптичного диска для довгострокового архівного зберігання. Загальновідомо, що сучасні оптичні диски не можуть забезпечити необхідний рівень надійності через низьку стійкість полікарбонатної підкладки та недостатню адгезію до металевого шару. Було показано, що матеріал підкладки повинен бути хімічно, термічно та механічно стабільним. Основними причинами втрати даних є поява на основі дефектів опадів, таких як шорсткість поверхні та подряпини; тому підкладка оптичного диска повинна бути сформована з твердого монокристалічного матеріалу. Надійність отримання кількох даних вимагає, щоб середовище основи було стійким до світла та ультрафіолетового випромінювання. Іншим важливим фактором надійності є висока теплопровідність основи. Було продемонстровано, що недостатня теплопровідність викликає локалізоване нагрівання і призводить до постійної деформації диска. Крім того, лінійний коефіцієнт підкладки диска не повинен суттєво відрізнятись від значень для записуючого шару металу.

Дослідники Інституту запропонували використовувати монокристалічний сапфір як матеріал для підкладки диска. Монокристалічний сапфір – найтвердіший матеріал, а технологія вирощування його кристалів – це технологічний та доступний процес. Масове виробництво монокристалів сапфіру сьогодні освоєно у багатьох країнах світу. Сапфір використовується для виробництва світлодіодів, захисних екранів для смартфонів, ілюмінаторів для підводних човнів та космічних кораблів. Застосування сапфіру як підкладки для дисків для

тривалого зберігання інформації було очевидним, але наявність оптичної анізотропії монокристала сапфіра перешкоджало створенню цифрового оптичного сапфірового диска. Основним недоліком використання сапфірів є оптична анізотропія, яка викликає необхідність інтегрувати інструменти для компенсації аберацій. Було розглянуто вплив двоприменезаломлення на розподіл лазерного променя при фокусуванні крізь одновісний кристал з двоприменезаломленням, що має вертикальну орієнтацію оптичної осі. Отримано вираз для розрахунку геометричних аберацій сфокусованого лазерного променя в монокристалічній підкладці оптичного диска. Допустимі рівні анізотропії були розраховані для оптичних дисків різних форматів, дисків допустимої товщини різних форматів та максимальної товщини сапфірових оптичних дисків, у яких немає значних спотворень сигналу. Розроблено метод компенсації аберацій при зчитуванні даних з одновісного кристалу з двоприменезаломленням. Також були розраховані основні параметри системи зчитування для сапфірового диска з вертикальною оптичною орієнтацією осі. Отримано структурні параметри оптичної дискової сапфірової підкладки та кварцової компенсаційної пластини різних форматів. Проведена експериментальна перевірка методу компенсації аберацій, яка показала, що якість зображень, отриманих через скляну та сапфірову пластини з компенсацією, була практично однаковою. Таким чином, застосування компенсаційної кварцової пластини надалі дозволяє зчитувати інформацію з оптичного сапфірового диска для збереження інформації. ІРІ НАНУ разом з Інститутом монокристалів НАН України вирішили цю проблему. В результаті був досягнутий прорив, який полягав у пошуку способу компенсації оптичної анізотропії монокристалічного сапфіру та створення першого у світі цифрового оптичного диска з рельєфом на сапфіровій підкладці.

I. V. Gorbov, V. V. Petrov, A. A. Kryuchyn

USING ION BEAMS FOR CREATION OF NANOSTRUCTURES ON THE SURFACE OF HIGH-STABLE MATERIALS

Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics.
2007. V. 10, № 1. P. 27-29.

Abstract. Main ion-beam etching techniques for creation of nanostructures on the surface of high-stable materials have been considered. Methods of information recording in the form of nanostructure on the metallic substrate surface have been analyzed. Application of glass substrate for creation long-term data carrier was proposed. Microrelief information record on the glass substrate surface was obtained using the ion-beam etching.

Keywords: dry etching technique, ion-beam etching, reactive ion-beam etching, high-stable material, nanostructure, glass substrate, long-term data carrier.

INTRODUCTION

Micro- and nano-structuring the surfaces is important for the production of many components and systems such as gratings, diffractive optical elements, data carriers, planar wave-guide devices. Although wet etching is well developed for some of these applications, it has inherent limitations caused by undercutting of mask materials, especially for micron and submicron pattern sizes [1]. Dry etching techniques, on the other hand, can generate anisotropic etch profiles and for this reason have come into favour.

The performance of recorded information in the form of microrelief structure on the high-stable material substrate surface is one of the basic approaches for the long-term data storage. Norsam Technologies Inc.

realizes data recording on the nickel substrate surface in analog and digital form [2]. The same data carrier is reliable but very expensive. Employment of inexpensive material (quartz, sapphire, silicon, glass) is more appropriate in most cases of archive storage.

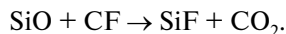
ANALYSIS OF ION-BEAM ETCHING TECHNIQUE

Most usually nanostructure creation on the substrate surface is realized by the etching via a protective contact mask with preformed image. The contact mask image size and type of the etching define dimensions of nanostructures. The masks can be classified by three classes: organic polymer film masks (photoresist, electron-beam resist and ion-beam resist), metal film masks and inorganic or dielectric film masks (carbon, silicon dioxide and nitride) [3]. Using the electron-beam and ion-beam resists allows to create a preformed mask image with 50 nm resolution [4].

Data recording density increase causes a reduction of the structure characteristic dimensions, for example, a track width of Blue-Ray Disc is 150 nm. The methods of etching with a highest resolution are those with using the focused ion beams, especially ion beam etching and reactive ion beam etching. The ion beam etching implicates substrate surface layer removal by means of physical material sputtering by the inert gas energetic ions that are chemically passive to the substrate materials.

The mechanism of material removal in reactive ion beam etching is rather due to chemical reaction between reactive particles and the substrate material atoms than physical sputtering [5]. Although many researchers recognize that these two mechanisms are synergistic, i.e. the bombardment catalyzes the surface chemical reactions. Thus, this method of etching is also called chemically assisted ion beam etching.

But although widely developed for silicon dioxide (on silicon), as well as to silica (quartz) glass substrates, there has been limited study of multi-component silicate or phosphate glass. In the case of silicon dioxide (silica), CF_4 and/or CHF_3 are commonly used dry etching gases because they generate highly volatile SiF_4 , CO/CO_2 and H_2O reaction products. Due to [1] the net reaction in CF_4 , for example, is



EXPERIMENTS AND RESULTS

The data layer in the form of micropits was obtained on the glass substrate surface using ion beam etching (Fig. 1).

The method of data recording is shown in Fig. 2.

On the glass substrate with a positive photoresist layer, the data recording laser beam was focused. The ion-beam etching was performed via mask windows that appeared in the photoresist layer after selective etching.

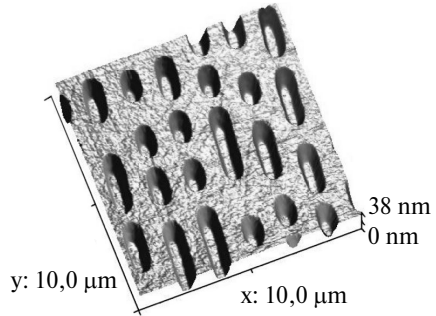


Fig. 1. Microrelief structure of the data layer on the glass substrate surface

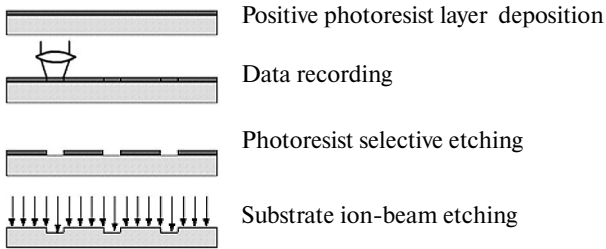


Fig. 2. Data layer creation on the high-stable substrate

The photoresist film was firmly adherent to the glass substrates and could not be re-moved in acetone or the commercial stripping solution after the etching process (presumably, due to some bombardment or electric field induced interfaces reactions). Thus, it was neces-sary to use O₂ plasma to remove the residual photoresist.

The scheme of ion beam etching system is shown in Fig. 3. The gas source consists of two collars (8, 9) with bore on the top side. It is under dc voltage 2 kV. Inert gas (Ar) comes into it through the insulator 10. Plasma is generated by glow discharge in the space between the gas source and grounded electrode 7. The ion beam is extracted from it by means of

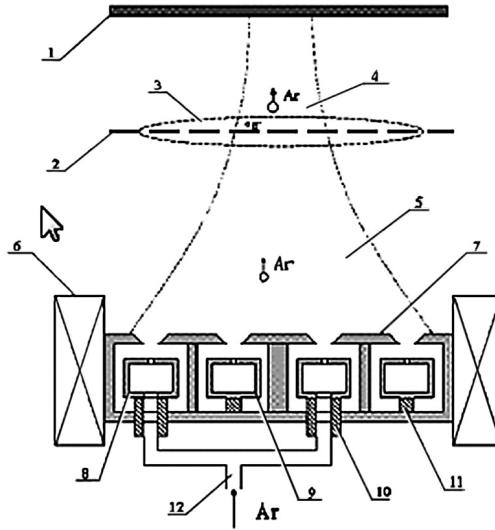


Fig. 3. The scheme of the ion beam etching system: 1 – working part; 2 – electron emitter (tungsten filament); 3 – electron cloud; 4 – neutralized ion beam; 5 – ion beam; 6 – focusing coil; 7 – grounded electrode; 8 – alive external gas source; 9 – alive internal gas source; 10 – insulator with gas input; 11 – insulator; 12 – gas input

electrostatic field and focused using the coil 6. Ion beam consists of positive charge particles 5 that cause formation of the surface charge on the working part of the surface 1. It is insufficient for the ion beam etching of the metal substrate, because a surface charge drains to grounded body. But stored surface charge inhibits further etching of the dielectric working part. Therefore, we used the tungsten filament 2 as an electron emitter to form an electron cloud 3 for creation of neutralized ion beam 4.

CONCLUSIONS

Using the ion beam allows to create a nanostructure on the high-stable material surface. Nanostructure dimensions are defined by material masks and image record methods. The ion-beam (and reactive ion-beam) etching can be used for creation of long-term data carrier. The mentioned data recording method is appropriate for other high-stable material substrates. It is necessary to select a proper protective contact mask, operating gas mixture and etching regime.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank the staff of V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of NAS of Ukraine for their assistance in nanostructure measurements

REFERENCES

1. E. Metwalli, C.G. Pantano, Reactive ion etching of glasses: composition dependence // Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Research. B 207, p. 21-27 (2003).
2. Norsam Technologies Inc. <http://norsam.com/hdrosetta.htm>.
3. B.S. Danilin, V.Yu. Kireyev, Ion etching of microstructures. Sov. Radio, Moscow, 1979 (in Russian).
4. A. Hohenau, H. Ditlbacher, B. Lamprecht, J.R. Krenn, A. Leitner, F.R. Aussenegg, Electron beam lithography, a helpful tool for nanooptics // Micro-electronic Engineering 83, p. 1464-1467 (2006).
5. B.S. Danilin, V.Yu. Kireev, Application the low-temperature plasma for etching and cleaning of materials. Energoatomizdat, Moscow, 1987 (in Russian).

В. В. Петров, В. М. Пузиков, А. А. Крючин, И. В. Горбов

ОПТИЧЕСКИЕ ДИСКИ ДЛЯ ДОЛГОВРЕМЕННОГО ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

*Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии.
2009. Т. 7. № 3. С. 825-832.*

Рассмотрены технологии изготовления оптических дисковых носителей, предназначенных для долговременного хранения информации. Показано, что использование сапфировых подложек позволяет создать носители, на которых прогнозируемый срок хранения данных составляет тысячи лет. Рассмотрены способы формирования наноструктурного рельефа на поверхности высокостабильных материалов. Представлены экспериментальные результаты исследования процесса записи информации на оптические диски с сапфировыми подложками.

Розглянуто технології виготовлення оптичних дискових носіїв, які призначені для довготермінового зберігання інформації. Показано, що використання сапфірових підкладок дозволяє створити носії, на яких прогнозований термін зберігання даних становить тисячі років. Розглянуто способи формування наноструктурного рельєфу на поверхні високостабільних матеріалів. Представлено експериментальні результати досліджень процесу запису інформації на оптичні диски з сапфіровими підкладками.

Manufacture techniques of optical disc media for long-term data storage are considered. As demonstrated, the use of sapphire substrates allows creating media with the predicted data-storage term of thousands of years. Techniques for nanostructured relief forming on high-stable material surface are studied. Experimental results for process of data recording on optical disks with sapphire substrates are presented.

Ключевые слова: долговременное хранение информации, оптические диски, сапфир, ионно-лучевое травление, микрорельеф.

ВВЕДЕНИЕ

Оптические системы записи информации обладают большими потенциальными возможностями по обеспечению надежного и длительного хранения информации. Однако для обеспечения возможности массового распространения информации на оптических носителях основное внимание было уделено созданию технологии изготовления дешевых носителей методом инжекционного литья поликарбоната. Полимерные подложки с рельефной микроструктурой используются во всех типах компакт-дисков. Система распространения информации на компакт-дисках позволяет рассматривать ее и как систему компьютерного книгопечатания [1, 2]. При создании технологии хранения и распространения информации на компакт-дисках не ставилась задача создания на их основе систем долговременного хранения информации. Проведенные многочисленные исследования позволили установить причины достаточно быстрого выхода из строя компакт-дисков, а именно:

- механические повреждения поверхностей компакт-дисков;
- отслоение отражающего металлического слоя от подложки с микрорельефной структурой;
- деформация поверхности компакт-дисков при многократных считываниях;
- повреждения поликарбонатной подложки микроорганизмами.

В связи с прогнозируемым широким использованием ББ-компакт-дисков существенное внимание уделяется повышению их срока службы. В первую очередь, рассматривается возможность применения защитных слоев, предотвращающих механические повреждения носителя информации [3].

Цель настоящей работы — получение наноразмерного информационного рельефа на поверхности высокостабильных материалов и разработка на их основе оптических носителей, у которых прогнозируемый срок хранения данных превышает тысячу лет.

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКИХ ДИСКОВ, ИСПОЛЗУЕМЫХ ДЛЯ ДОЛГОВРЕМЕННОГО ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Для решения проблемы длительного хранения данных предлагается использовать специальные оптические диски, которые получили название профессиональных (табл. 1).

Основные отличия профессиональных оптических дисков от потребительских компакт-дисков состоят в том, что для защиты от механических повреждений и загрязнений используются специальные герметичные контейнеры, для уменьшения времени произвольного доступа к информации она записывается на концентрических дорожках (в отличие от компакт-дисков, в которых используется спиральная дорожка). В профессиональных оптических дисках используется режим работы WORM. В качестве материала подложки применяются специальные типы силикатного стекла. Наибольший срок хранения данных при использовании режима записи WORM обеспечивают региструемые материалы с необратимыми фазовыми переходами [4].

Предельные сроки хранения данных для носителей, информация на которых записана в виде микрорельефной структуры, определяются

Таблица 1. Характеристики профессиональных оптических носителей для длительного хранения информации

| Характеристики \ Тип носителя | РЕД (профессиональный диск) | UDO 1 | UDO 2 |
|---|--------------------------------|-------|-------|
| Емкость, Гбайт | 23 | 30 | 60 |
| Диаметр, мм | 120 | 130 | 130 |
| Длина волны лазера считывания, нм | 405 | 405 | 405 |
| Скорость (1x) считывания, Мбит/с | 88 | 80 | 80 |
| Скорость (1x) записи, Мбит/с | 72 | 80 | 80 |
| Числовая апертура фокусирующего объектива | 0,85 | 0,85 | 0,85 |

временем изменения формы углублений (питов) на их поверхности. Очевидно, что превышения температуры над значением температуры плавления материала подложки приведут к потере записанной информации. Максимальный срок хранения информации на оптических носителях может быть оценен из уравнения Эйринга [5]. Тогда соотношение предельных сроков хранения данных t_1 и t_2 на носителях с разными значениями температуры плавления материала подложки $T_{пл1}$ и $T_{пл2}$ можно выразить следующим образом [6]:

$$t_1/t_2 = \exp \frac{T_{пл1} - T_{пл2}}{T} .$$

По различным оценкам, основанным на ускоренном искусственном старении носителей, максимальный прогнозируемый срок службы стандартных поликарбонатных компакт-дисков составляет от 20 до 50 лет и зависит от условий хранения (табл. 2). Поэтому в случае использования оптических дисков для долговременного хранения информации они должны содержаться в определенных климатических условиях (температура 20 °С, относительная влажность 40 %) [7]. Это требует серьезных материальных затрат как на создание таких хранилищ, так и на поддержание их работы.

Таблица 2. **Срок хранения данных на носителях с разными материалами подложки**

| Материал подложки | Температура плавления, К | Срок хранения данных относительно компакт-дисков из поликарбоната | Срок хранения, лет |
|-------------------|--------------------------|---|--------------------|
| Поликарбонат | 523 | 1 | ~ 20 |
| Натриевое стекло | 923 | $e^{1,30} = 3,91$ | ~ 80 |
| Ситалл | 1696 | $e^{4,00} = 54,78$ | ~ 1100 |
| Кварцевое стекло | 1986 | $e^{4,99} = 140,94$ | ~ 2900 |
| Сапфир | 2318 | $e^{6,13} = 457,73$ | ~ 9000 |

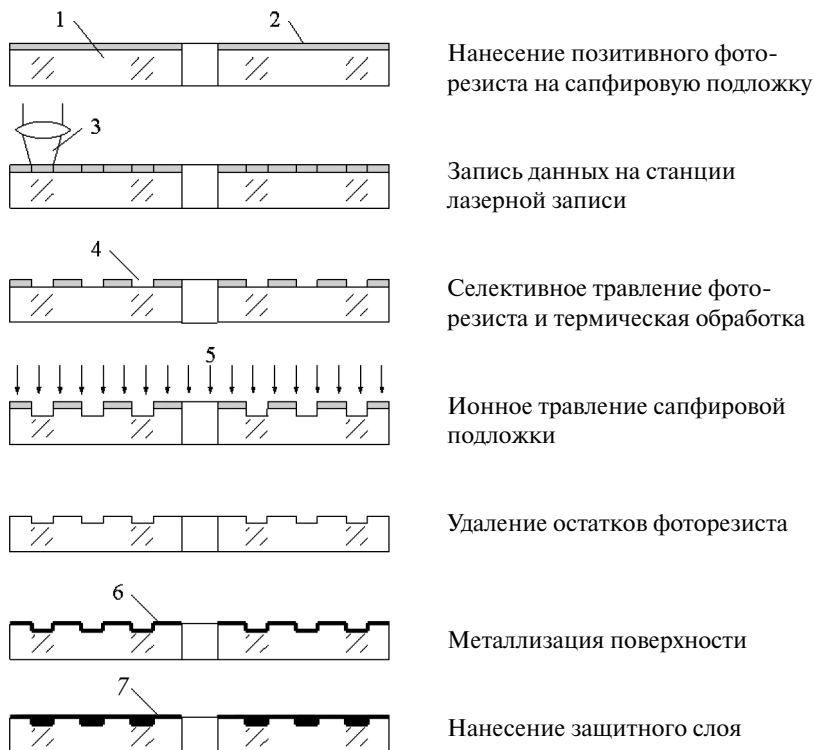


Рис. 1. Схема процесса изготовления оптического носителя для долговременного хранения данных [8, 9]: 1 — подложка; 2 — слой позитивного фоторезиста; 3 — сфокусированный лазерный луч; 4 — окно в слое фоторезиста; 5 — ионный пучок; 6 — металлический отражающий слой; 7 — слой защитного лака

Использование сапфира позволяет создать оптические носители со сроком хранения более 9000 лет. Уникальные физические свойства сапфира, его механическая и химическая стойкость, позволяют хранить их в любых условиях, не беспокоясь за возможные повреждения носителя в случае пожара, наводнения или химического загрязнения территории хранилища. Однако благодаря этим же достоинствам достаточно сложно записать информацию на поверхность сапфирового диска. Дополнительное преимущество использования монокристаллических подложек состоит в том, что по сравнению с подложками из многокомпонентных материалов, таких как силикатные (боросиликатные) стекла, они обеспечивают возможность получения микро-рельефных структур с большей разрешающей способностью.

ЗАПИСЬ ИНФОРМАЦИИ НА ОПТИЧЕСКИЕ ДИСКИ С САПФИРОВЫМИ ПОДЛОЖКАМИ

Процесс записи информации на оптические носители для долговременного хранения данных состоит из ряда технологических операций, которые используются при производстве дисков-оригиналов фоторезистивным методом. На сапфировую подложку методом центрифугирования наносится слой позитивного фоторезиста, на который на станции лазерной записи сфокусированным лучом записывается информация (рис. 1).

После селективного химического травления в слое фоторезиста образуются окна, сквозь которые осуществляется травление сапфира. В процессе изготовления оптических носителей для долговременного хранения данных, в отличие от процесса изготовления дисков-оригиналов, необходимо использовать слои фоторезиста большой толщины. Толщина слоя фоторезиста определяется из соотношения скоростей травления сапфира и фоторезиста. Для получения питов глубиной (100-120) нм на поверхности сапфировой подложки толщина слоя фоторезиста Shipley 1813 (который чаще всего используется в процессе изготовления компакт-дисков) составляет около 200 нм. Отметим, что из-за того, что показатель преломления сапфира составляет 1,77 (в отличие от 1,58 у поликарбоната), для сохранения размера сфокусированного пятна на поверхности информационного слоя и соответствия

стандарту CD толщина сапфирового диска должна быть 1 мм (толщина поликарбонатного компакт-диска — 1,2 мм).

Так как сапфир характеризуется высокой стойкостью к химически активным веществам, получить рельеф на его поверхности химическим способом невозможно. К тому же, химический способ травления не позволяет получать структуры с разрешением менее 1 мкм, что недостаточно для записи информации на оптические носители [8]. Для сравнения, ширина пита в формате CD составляет 500 нм, DVD — 320 нм, а BD — 220 нм.

Получить необходимый микрорельеф на поверхности сапфирового диска можно путем травления с использованием низкотемпературной газоразрядной плазмы, а именно с помощью ионнолучевого травления, которое позволяет получать структуры шириной до 50 нм.

Для экспериментальных исследований процесса формирования рельефа на поверхности сапфировых дисков была выбрана вакуумная установка ВУ-1А. Вакуумная камера выбранной установки позволяет эффективно расположить источник ионов и обрабатываемую подложку, а система откачки позволяет получить необходимый вакуум. Для формирования ионного пучка использовался источник ионов ИОН-2, наличие холодного катода в котором позволяет получать ионы различных смесей активных и реактивных газов.

Анализ различных газовых смесей показал, что для травления сапфировой подложки в качестве рабочего газа целесообразно использовать газ CF_4 с различной парциальной составляющей аргона. Максимальная плотность ионного тока в устойчивом режиме работы источника составляла 10 mA/cm^2 , что соответствовало скорости травления 5 nm/min . Таким образом на поверхности сапфирового диска был получен информационный рельеф, максимальная глубина которого составляла 95 nm , а структура полностью соответствовала формату представления данных на стандартном компакт-диске (рис. 2).

В результате проведенных исследований на поверхность сапфирового диска была записана информация с плотностью $65,1 \text{ MB/cm}^2$ в формате CD, а также была показана возможность записи данных с большей плотностью в форматах DVD и BD. В качестве отражающего слоя использовались не только пленки алюминия, которые традиционно применяются при производстве оптических дисков, но и пленки никеля, характеризующиеся высокой механической и химической стойкостью.

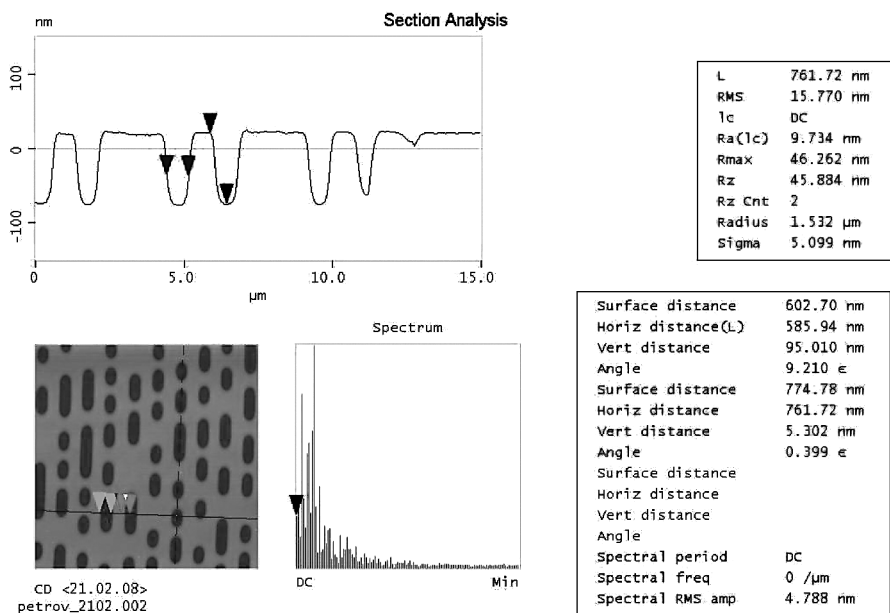


Рис. 2. Информационный рельеф на поверхности сапфирового оптического диска

ВЫВОДЫ

Для изготовления профессиональных оптических дисков, предназначенных для длительного хранения информации, целесообразно использовать подложки, изготовленные из высокостабильных материалов. При изготовлении оптических носителей, запись данных на которые производится в формате BD носителей, могут применяться подложки из кремния и сапфира.

Запись информации в виде микрорельефных структур на носители с подложками из высокостабильных материалов может производиться на станции лазерной записи дисков-оригиналов с последующим плазмохимическим травлением подложки.

Повышению надежности хранения информации на оптических носителях, подложки которых выполнены из высокостабильных неорганических материалов, способствует применение отражающих покрытий из высокотемпературных оксидных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Петров, А. А. Крючин, С. М. Шанойло, Л. И. Крючина, И. О. Косско *Металеві носії для довготермінового зберігання інформації* (Киев: Наукова думка: 2005).
2. D. Sorid and B. H. Schechtman, *Optics and Photonics News*, 18, No. 5: 34 (2007).
3. Создан первый Blu-ray-диск с гарантией 200 лет. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://ncm.ru/news/news_014_080710.shtml
4. В. В. Петров, А. А. Крючин, В. Г. Кравець, *Доповіді НАН України*, № 4: 52 (2003).
5. Y. Okino, M. Irie, T. Kubo, and M. Okuda, *Proc. of SPIE*, 5966: 5966 1Z-1 (2005).
6. І. В. Горбов, В. О. Беяковський, *Реєстрація, зберігання і обробка даних*, 9, № 3: 73 (2007).
7. И. В. Горбов, *Вісник Донецького університету, Серія А, Природничі науки*, № 2: 419 (2005).
8. В. В. Петров, А. А. Крючин, С. М. Шанойло, В. О. Беяковський, І. В. Горбов, Спосіб виготовлення оптичного носія для довготермінового зберігання даних (Пат. 81519 Україна, МПК О 11 В 7/26.; заявник та власник — Ін-т проблем реєстрації інформації НАН України. — № а200601504. Заявл. 14.02.2006. Опубл. 10.01.2008. Бюл. № 1).
9. В. В. Петров, В. П. Семиноженко, В. М. Пузиков, О. Я. Данько, А. А. Крючин, С. М. Шанойло, Л. В. Бутенко, І. О. Косско, *Носій для довготермінового зберігання інформації* (Пат. 73611 Україна. — Опубл. 15.08.2005. Бюл. № 8).
10. Б. С. Данилин, В. Ю. Киреев, *Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов* (Москва: Энергоатомиздат: 1987).

V. Petrov, A. Kryuchyn, I. Gorbov

HIGH-DENSITY OPTICAL DISKS FOR LONG-TERM INFORMATION STORAGE

Abstract Book "22nd General Congress of the International Commission for Optics" (ICO-22) /Ed. Ramon Rodriguez-Vera (CIO), Rufino Diaz-Uribe (CCADET-UNAM). 15-19 August 2011. Puebla, Mexico. P.260-261.

Abstract. Optical discs are widely used for storage of archival data represented in a digital form. Long-term storage of information recorded on standard CDs is provided by periodical rewriting (once in 3-5 years) on the new carriers. High-stable light-sensitive materials and special reflective metal coatings are proposed to use for increasing the information storage terms of the optical discs. The conducted researches have showed that the application of vitreous chalcogenide semiconductors in optical WORM discs assures the data storage terms up to 30 years. Substantially larger terms of data storage can be realized on the optical ROM carriers. Attainment of the guaranteed data storage terms within several hundreds years is provided in such carriers by applying high-stable materials substrates and information should be represented in the form of a micro-relief structure on the substrate surface. Sapphire, quartz, silicon, glass-ceramics and other materials can be utilized for manufacturing substrates of optical BD discs (and other subsequent high-density disc formats). These materials allow creating substrates characterized with increased melting temperature, chemical and mechanical resistance. Furthermore, using the mentioned materials for substrates production permits applying high temperature materials, such as chrome and nickel, to creation of high-stable refractive layers and demonstrating the sufficient mechanical adhesion between the refractive layer and the substrate. Modern methods of thermo-lithography offers creating of nano-size images on photo-resist layer deposited on the substrates. Those images can be transformed to the nano-size relief structures on the surface of the high-stable materials substrates by techniques of reactive ion-beam etching.

Keywords: long-term data storage, optical carrier, ion-beam etching, micro-relief, sapphire, chalcogenide vitreous semiconductor

1. INTRODUCTION

Optical media have sufficient potential for building a reliable long-term data storage system. Optical discs are quite resistant against effects both electromagnetic fields and high humidity. Moreover, the contactless reading process guarantees undamaging multiple information play-back. Nevertheless, in the process of realization of large-scale information dissemination on optical discs, the main attention was focused on creation of a cheap manufacturing technique based on the polycarbonate injection molding. The polymeric substrates with relief microstructure are applied in all types of optical discs. The data distribution system based on CD allows considering it as a system of computer typography. At the same time, the problem of the long-term data storage system was not an actual goal when the CD manufacturing technique was under development. The study of optical disc lifetime demonstrated that the main reasons of sufficiently fast failure are as follows:

- mechanical damage of optical disc surface;
- separation of the reflective metallic layer from the substrate;
- deformation of optical disk surface by repeated playback;
- damage of the polycarbonate substrate by microorganisms.

In relation to predicted wide applications of Blu-ray discs (BD), their longevity is a subject of a great interest. The availability of protecting coatings for prevention from mechanical damages has to be studied first of all.

The WORM media based on high-stable inorganic light-sensitive materials ensure maximal reliability and storage terms among other information optical carriers. The greater reliability can be realized by the optical media where storage unit (or even track) is represented as a relief on the surface of high-stable inorganic material.

This work is aimed at the study of properties of recorded WORM carriers after long-term storage in severe environment. The other goal of the article is possible ways in obtaining information nanostructures created on the high-stable material surface and development optical media with predicted data storage terms exceeding 1000 years.

2. ANALYSIS OF RECORDING MATERIALS FOR WORM DISCS UTILIZED FOR LONG-TERM DATA STORAGE

The high reliability of data storage given by the WORM type optical disc was provided due to the recording method based on photo-thermal destruction of absorbing layer (ablation recording). Almost for thirty years of investigations devoted to registering media for optical discs with single-stage recording, there were offered many various types of registering media mainly founded on organic dyes, semiconductor materials and multi-layer metal alloys. The accomplished investigations demonstrated that the highest reliability of data storage takes place with the photo-thermal recording methods grounded on local destruction of the absorbing layer (i.e., ablation recording methods) as well as on registering media with creation of thermo-stimulated tips caused by melting metallic films [1-4]. In recent years, some interesting ideas were proposed to utilize the optical carriers made in accordance with the ablation recording method for long-term data storage with application of new light-absorbing materials [5]. Many attempts were fulfilled for estimation of the data storage terms of the WORM type optical carriers, and some accelerated tests to determine these terms were performed. But it seems reasonable to analyze changes in optical carrier performances under conditions of long-term storage. In this connection the properties investigations of the optical carriers, having written 25 years ago by means of the ablation method, have been accomplished by us.

For a long time, tellurium alloys were widely applied to create registering media for the WORM type optical carriers [1, 2, 6, 7]. The choice of these materials was dictated by the fact that thin films of the tellurium alloys possess low thermal conductivity and low melting temperature. This circumstance provides high resolution of registering media based on the tellurium vitreous alloys (minimum size of recorded pits is close to 0.3–0.5 μm) as well as the possibility to record information with low-powered semiconductor lasers. The performed experimental researches revealed that a dense oxide layer is created on the surface of tellurium glassy alloys. In the process of manufacture of the WORM type optical disc carriers, the main attention was paid to the choice of materials for registering media capable to provide long-term storage of recorded data. Tens of glassy tellurium alloy compositions were studied to use them as registering media for optical disc carriers of the above-mentioned type.

In accordance with the preliminary calculations, four component eutectic alloy of $\text{Te}_{14}\text{Sb}_{10}\text{Se}_{61}\text{Ge}_{15}$ was chosen [7]. The alloy is feasible to provide long-term storage of recorded information. The distinction of this alloy consists of necessity to apply radiation with the wavelengths shorter than 550 nm to record information. Being aimed at performing the comparative investigations of optical carriers, there were manufactured optical discs with registering media containing more than 60 % of tellurium. The advantages of these carriers were so that information recording in them could be realized by infra-red lasers. But the main reason in use of the tellurium alloys instead of pure tellurium films was the necessity to increase the corrosion hardness of registering media. On the surface of tellurium alloys with Sb, Se, Ge, there arise dense oxide films that reduce the speed of tellurium oxidation [8]. It was thought that the oxide film appearing on the surface of vitreous tellurium layer would protect it against further oxygen penetration. The methods of accelerated aging (exposure of the samples in the premises with increased humidity and temperature) demonstrated that the growth speed inherent to the thickness of the oxide layer is abruptly reduced with increasing its thickness. The layer-by-layer Auger analysis of registering medium $\text{Te}_{14}\text{Sb}_{10}\text{Se}_{61}\text{Ge}_{15}$ manufactured 30 years ago showed that the oxygen content did not exceed 13 at.%, and the oxygen was uniformly distributed along the layer' thickness. The fragments of respective Auger spectra are depicted in Fig. 1. In the initial state (Fig. 1a), at the oxygen background, the lines of 475, 490, 511 eV (the latter is the main peak) belonging to Sb and Te are not registered. After etching the oxide film (Fig. 1b), the Sb and Te peaks are appeared (457 and 498 eV), and the oxygen content is reduced down to approximately 13 at.%. In the case of tellurium, superposition of the main tellurium Auger peak with the oxygen one takes place. Observed there is the

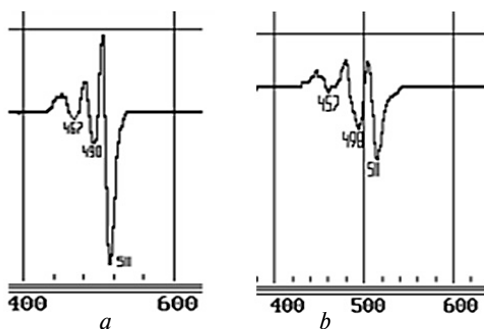


Fig. 1. Distribution of oxygen in registering medium $\text{Te}_{14}\text{Sb}_{10}\text{Se}_{61}\text{Ge}_{15}$ before etching (a) and after etching with argon ion beam down to the depths 25-50 nm (b)

shift of the peak from the scale position 491 up to 498 eV. It means that the oxygen passivated film of the multi-component chalcogenides preserves its chemical composition, whereas the oxide film is easily etched by argon ion beam. It is noteworthy that oxygen distribution has a similar character both in unsealed registering media and in those covered with a protective polymer layer. Availability of considerable oxygen amount in this registering media can be related with technological features of manufacturing the thin registering layer. When using vacuum deposition, there occurs a considerable amount of broken bonds in the structure of chalcogenide glass which results in stage-by-stage accumulation of oxygen in this thin film.

Recording information onto optical disc carriers with the registering layer $\text{Te}_{14}\text{Sb}_{10}\text{Se}_{61}\text{Ge}_{15}$ was realized by employing focused radiation of a solid-state laser with the wavelength 530 nm. This record was possible due to formation of pits in the absorbing chalcogenide layer. The information was registered on carriers of two types. The first carrier was just the optical disc with open surface of the absorbing layer whereas the second one had the light-absorbing information layer protected with a polymer film.

In both cases, laser radiation was focused through transparent glass substrate of 3-mm thickness by using a special objective with the numeric aperture of 0.65. In the latter case, we joined two substrates of the optical carrier. The thickness of the polymer layer was close to 0.5 mm. That provided an independent recording process for each substrate of the optical carrier. After long-term storage (25 years), these optical disc carriers kept mirror reflection and uniformity of coating layers within the area of data recording. The shape and sizes of the pits appeared to be slightly changed. The sizes occurred to be a little larger. Fig. 2 shows the view of the recording zone on the optical carrier after its 25-year storage.

In the course of manufacturing the optical carrier, the surface of registering medium was processed with focused laser radiation to create concentric guide tracks. The information recording was realized on one or both sides of the guide tracks. This way forming the guide tracks is rather technological (it does not require any special preparation of the information carrier substrate and the tracks can be recorded using the facility for information recording). However, this way has essential deficiencies, namely:

- registering medium of the information carrier is separated by narrow strips which can have a negative impact on the carrier storage term;
- availability of a bowl formed from material of the registering medium along the guide tracks results in reduced density of information recording.

A higher density of recording can be reached in the case when the guide tracks are formed in a substrate. It can be realized in glass substrates by using plasmochemical etching [9, 10]. After long-term storage of the optical carrier with registering medium $\text{Te}_{14}\text{Sb}_{10}\text{Se}_{61}\text{Ge}_{15}$, guide tracks were sustained unchanged and their sizes did not change within accuracy limits (Fig. 3) [6].

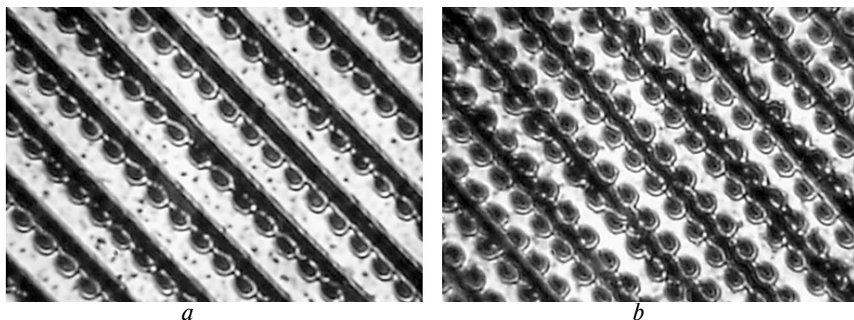


Fig. 2. External view of the recording zone on the optical carrier: data recording is realized from one side of the guide track (a) and from both sides (b)

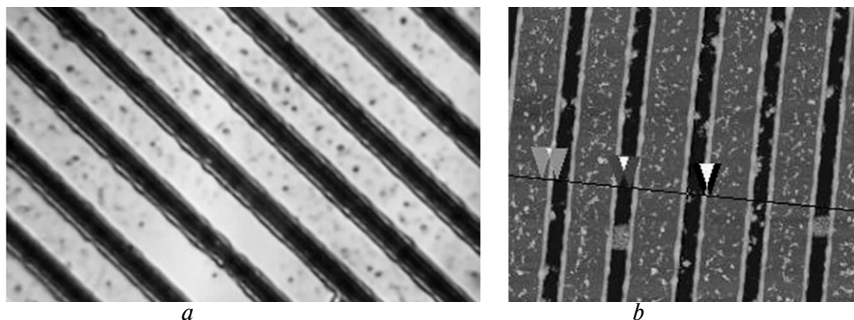


Fig. 3. Guide tracks on the optical disc carrier with registering medium $\text{Te}_{14}\text{Sb}_{10}\text{Se}_{61}\text{Ge}_{15}$ (track pitch $1.6 \mu\text{m}$). The images were obtained using: a) an optical microscope; b) a scanning tunnel microscope [6]

3. OPTICAL MEDIA FOR LONG-TERM DATA STORAGE BASED ON INORGANIC SUBSTRATES

As a whole, hopes to create optical disc carriers of the WORM type with glassy substrates based on vitreous chalcogenide semiconductors for long-term information storage are justified. However, our further investigations of properties inherent to optical carriers aimed at long-term storage have showed that optical carriers where micro-relief structure is formed in the glassy substrate based on highly stable material have considerably higher reliability. In optical carriers where data recording is realized in CD and DVD formats, so as to make these substrates one can use optically transparent silicate or borosilicate glasses as well as silica ones. In order to produce Blu-ray carriers, beside the above mentioned materials, one can use substrates made of sapphire ones.

There is a growing interest in using the substrates made of inorganic materials (sapphire, silica and silicate glasses) in recent time. Storage terms of data recorded in the form of micro-relief structures on the media surface are limited by the time of changing the pit form on this surface. It is obvious that an excess of temperature over the melting point leads to loss of recorded data. The maximal storage term of data recorded on the optical media can be estimated applying the Eyring equation [11]. Then the relation of critical data storage terms t_1 and t_2 on the carriers with different melting temperatures of substrate materials T_1 and T_2 may be presented as:

$$\frac{t_1}{t_2} = \exp \frac{T_1 - T_2}{T} .$$

The studies of data storage terms on optical discs (CD-ROM and DVD-ROM) at the accelerated ageing shows that the estimated storage time on polycarbonate discs is about 20-50 years and depends on store conditions [12, 13]. Then optical discs must be kept in specified climatic conditions (20 °C temperature and 40 % relative humidity), if they are used for long-term data storage. This demands essential capital investments for building of special depositories as well as supporting their work. Though, forecasted storage terms of data recorded on the surface of the substrates based on inorganic materials may be considerably increased (Table 1).

Using the sapphire allows to create optical carriers with the data storage term exceeding 1000 years. Unique physical properties of sapphire as well as its mechanical and chemical stability enable storing the proposed media at

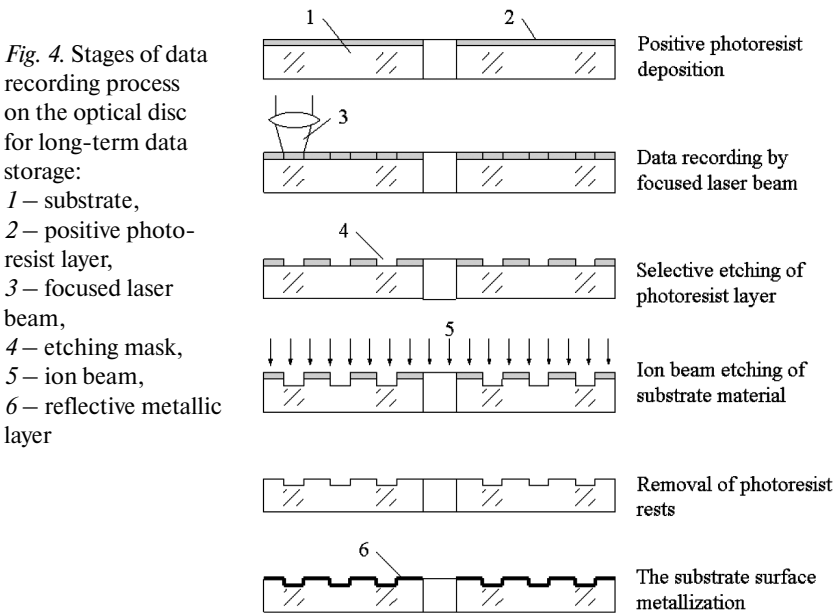
Table 1. Forecasted storage terms of data recorded as relief on the substrate surface

| Substrate material | Melting temperature, K | Data storage terms relative to those of the polycarbonate CD | Storage term, years |
|--------------------|------------------------|--|---------------------|
| Polycarbonate | 523 | 1 | ~20 |
| Sodium glass | 923 | $e^{1.36} = 3.91$ | ~80 |
| Glassceramic | 1696 | $e^{4.00} = 54.78$ | ~1100 |
| Silica glass | 1986 | $e^{4.99} = 146.94$ | ~2900 |
| Sapphire | 2318 | $e^{6.13} = 457.73$ | ~9000 |

any conditions not worrying about media failure in cases of fire, flood or chemical pollution of depository. At the same time, due to these qualities, it is sufficiently difficult to write data on sapphire disk surface. An additional advantage of monocrystalline substrates as compared to the multi-component material ones (for example, silicate glass) is the possibility to assure micro-relief structures with higher resolution.

4. DATA RECORDING ON OPTICAL DISCS WITH INORGANIC SUBSTRATES

Creation of the relief on high-stable material substrates directly by a focused laser beam is difficult for realization. Initially, information is recorded on a photo-resist layer. The process of data recording on optical discs for long-term data storage consists of some technological steps used for master disc fabrication by using the photo-resist method [14]. The photo-resist layer is deposited on the surface of sapphire substrate (Fig. 4) in a centrifuge. Information is recorded on the photo-resist layer in the laser recording system by a focused laser beam. The format of laser recording system defines the format of optical disc for long-term data storage. We used CD format for data recording. The etch mask is created by selective etching the recorded photo-resist layer. The information relief on the substrate surface is created by reactive ion beam etching. The pit depth is calculated in compliance with ISO/IEC 10149:1995 defining data interchange on read only 120 mm optical data disks (CD-ROM) [15]. The relief depth for sodium-siliceous glass (with the refractive index 1.51) was 120 nm, for silica glass (refractive index is 1.46) – 130 nm, and sapphire (refractive index is



1.77) – 110 nm. The difference between refractive indexes of inorganic materials and polycarbonate leads to different thicknesses of discs (thickness of sapphire disc must be 1.1 mm versus 1.2 mm thickness of polycarbonate disc).

The ratio of photo-resist and substrate material etching rates defines the thickness of the photo-resist layer. The data structures are to be within 110-130 nm depth. Therefore, the layer thickness of photo-resist Shipley 1813 used for production of master discs should be close to 150 nm.

A dry etching technique must be used for creation of data structures on inorganic substrates. Conventional wet chemical etching does not allow produce the structures with resolution lesser than 1 micrometer. Therefore, it is not enough a facility to record information in optical discs formats. For instance, the pit width for CD format is 500 nm, DVD – 320 nm and BD – 220 nm. Therewith, creation of the structures on the same material surface, for example sapphire, is impossible when using chemical etching, because it has a very low etch rate in comparison with those of etch masks. The photo resist remains are removed after etching, and the data relief is covered by a reflective metallic layer.

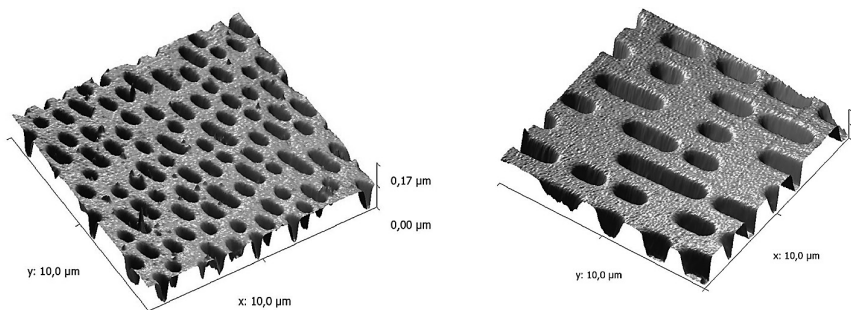


Fig. 5. Data structure in DVD (a) and CD (b) formats on the surfaces of sodium-siliceous glass substrate

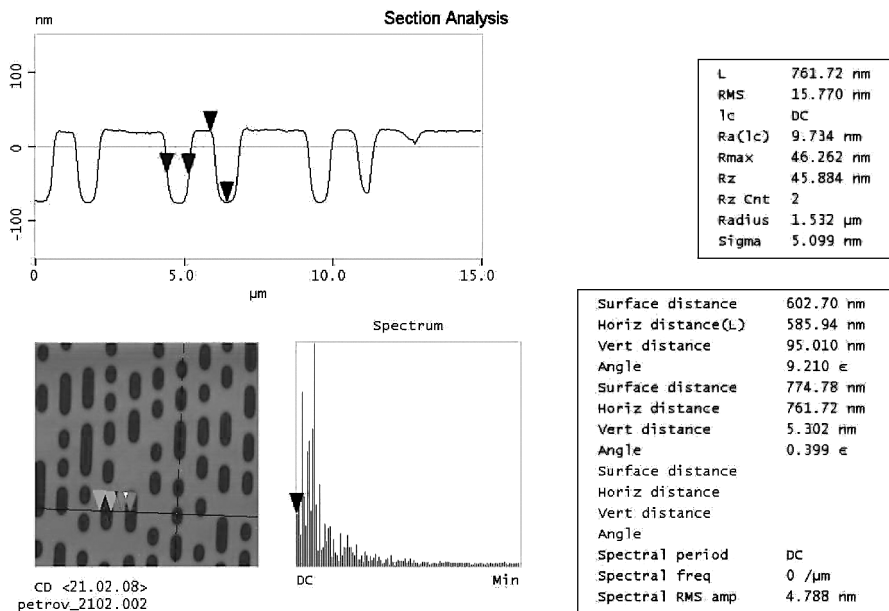


Fig. 6. Data structure in CD format on the surfaces of sapphire substrate

The ion source with a cold cathode was used for reactive ion beam etching of the substrate material. The study of various gas mixtures showed that ions of CF_4 with different Ar fractions had the highest etch rate. The maximal etch rate of substrate (15 nm/min for sodium-siliceous glass and 5 nm/min for sapphire) was obtained with 10 mA/cm² current density and 3-cm diameter of the ion beam accelerated up to 2.6 kV. The data structure of DVD format was formed on the surfaces of sodium-siliceous glass (Fig. 5) and the data structure of CD format was done on sapphire substrates (Fig. 6). The depths of relief built on the glass substrate were up to 150 nm and 95 nm on the sapphire substrate.

Consequently, the presented data recorded on the surface of sapphire disc with 65.1 MB/cm² density using CD format. Also, the opportunity of data recording in the high-density DVD and BD formats has been analyzed. There are nickel and chromium layers characterized both with high mechanical and chemical stability as well as aluminum films traditionally used for optical disc production and applied as reflective coating.

4. CONCLUSIONS

1. The optical carriers with registering media made of vitreous chalcogenide semiconductors for information recording by local photo-thermal destruction of the absorbing layer with focused laser radiation keep their physical properties in long-term storage.

2. The shape and sizes of pits coding information show inessential changes. Namely, it has been revealed only a small increase of the pit sizes.

3. The high-stable material substrates occurred appropriate for fabrication of professional optical discs for longterm data storage. Silicon and sapphire substrates can be used for fabrication high-density optical discs with relief-phase data modulation (BD and future formats) for long-term data storage.

4. Data recording in the form of micro-relief structure on the high-stable material substrate surface can be performed by master-disc laser recording station and ion-beam etching the substrate material.

5. The use of high-temperature materials as reflective coatings promotes improvement of the data storage on optical media based on the high-stable inorganic substrates.

REFERENCES

1. Petrov, V.V., Kryuchin, A.A., Shanoilo, S.M., Kravets, V.G., Kossko, I.O., Belyak, Ye.V., Lapchuk, A.S., Kostyukevych, S.O.. [Super-dense Optical Information Recording], Kyiv, Institute for information recording, NAS of Ukraine, 282 (2009) (in Ukrainian).
2. Petrov, V.V., Kryuchin, A.A., Tokar, A.P. et al., [Optical-and-mechanical Storage Facility], Kiev, Naukova dumka publisher, 152 (1992) (in Russian).
3. Saffady, W. "Optical Storage Technology, 1993: A state of Art Review", ISBN 0887368840 (1993).
4. Doroshenko, V.V, Kryuchin, A.A., Petrov, V.V., Yudin, G.Yu. "Carrier for optical recording" Authors' certificate № 970449 USSR, G 11 B 7/24 (1982).
5. Lunt, B.M., Linford, M.R., "Long-term digital data storage", Patent USA № 2008/0320205 (2008).
6. Petrov, V.V., Kryuchin, A.A., Gorbov, I.V., Kosko, I.O., Kostyukevich, S.O. "Analysis of properties of optical carriers after long-term storage", Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics 12(4), 399402 (2009).
7. Petrov, V.V., Kryuchin, A.A., Kostyukevych, S.O., Rubish, V.M., [Non-organic photolithography], Kyiv, Institute for Physics of Metals, NAS of Ukraine, 196 (2007) (in Ukrainian).
8. Lee, W., Chen, M., Weder, H., et al., "Stability of thin Te and Te alloy films for optical data storage", Proc. SPIE 382, 282-289 (1983).
9. Sato, K., Okamoto, I., Kitamoto, Y., Ishida, S., "Oblique ion nano-texturing technology for longitudinal recording media", Jpn. J. Appl. Phys. 46 (8A), 5139-5142 (2007).
10. Zhi-giang, R., Hong-li, F., Xin-ding, F., Guo-ming, Ch., "Fabricating master with reactive Ion Beam Etching Method", Chin. Phys. Lett. 15 (7), 495-497 (1998).
11. Okino, Y., Irie, M., Kubo, T., Okuda, M., "Estimating a life expectancy of high-density recordable optical discs", Proc. of SPIE. 1Z-1-5966 1Z-4, 5966-5968 (2005).
12. Okino, Y., Irie, M., Kubo, T. A, "New approach for estimating the life expectancy of optical disk for digital archival storage", Jap. J. Appl. Phys. 44 (5B), 3513-3515 (2005).
13. Slattery, O., Lu, R., Zheng, J., Byers, F., Tang, X. "Stability comparison of recordable optical discs — a study of error rates in harsh conditions", Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology 109 (5), 517-524 (2004).
14. Petrov, V.V., Kryuchin, A.A., Shanoilo, S.M., Belyakovsky, V.O., Gorbov, I.V. "The method of fabricating of optical carrier for long-term data storage ", Patent Ukraine № 81519, index G 11 B 7/26 (2008) (in Ukrainian).
15. Gorbov, I.V., "The influence of substrate's material refractive index on optical media data layer relief depth", Data recording, storage and processing, 11 (1), 3-10 (2009) (in Ukrainian).

В. В. Петров, В. П. Семиноженко

НОВІТНЯ ТЕХНОЛОГІЯ ДОВГОТРИВАЛОГО ЗБЕРІГАННЯ ІНФОРМАЦІЇ НА САПФІРОВИХ ОПТИЧНИХ ДИСКАХ

*Стенограма спільної доповіді на засіданні Президії НАН України
12 лютого 2014 року. Вісник НАН України. 2014. № 4. С. 1–8.*

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

Представьте себе, что недавно фирма Google закупила 400 тыс. на-

копителей 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 истле-

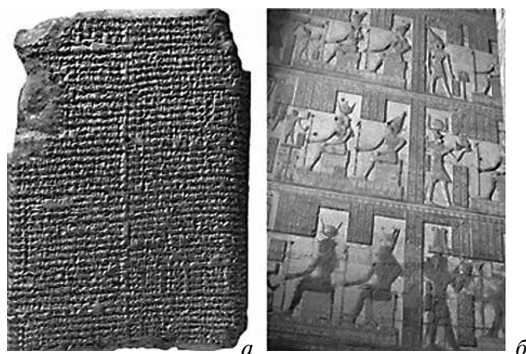


Рис. 1. Хранение информации в древности: а — клинописная табличка шумеров с описанием причин разрушения вавилонских городов Содомы и Гоморры, 700 г. до н.э.; б — стела храма Рамсеса IV, 1100 г. до н.э.

ло. То есть, сохранили информацию только те носители, которые были выполнены из химически стойких материалов (рис. 1).

Что такое глина? Глина — это суспензия двуокиси кремния и окиси алюминия, и когда она спекается, то превращается в химически 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 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 инъекционного литья из прозрачного поликарбоната. Эта технология позволила решить массу актуальных проблем, однако каждый следующий шаг по увеличению плотности записи 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.

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, 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 фемто-секундным 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 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. 2).

Вот простая иллюстрация (рис. 3). Самая первая фотография сделана без компенсирующей поляризационной пластинки, а другая – с компенсирующей поляризационной пластинкой на сафире. Сразу

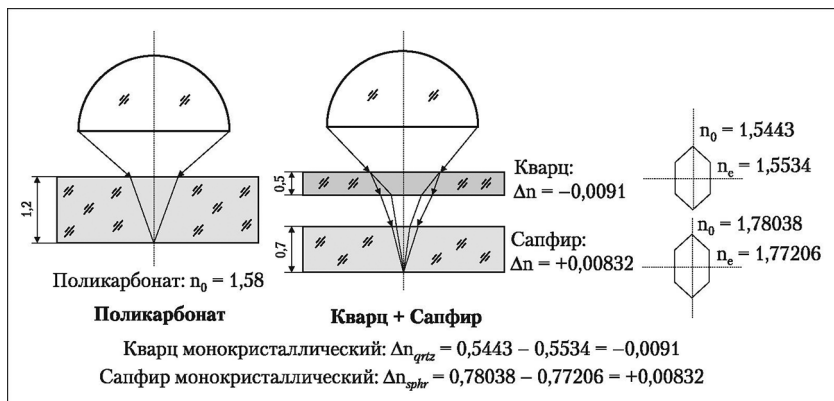


Рис. 2. Компенсация поляризационных aberrаций в сапфировой подложке

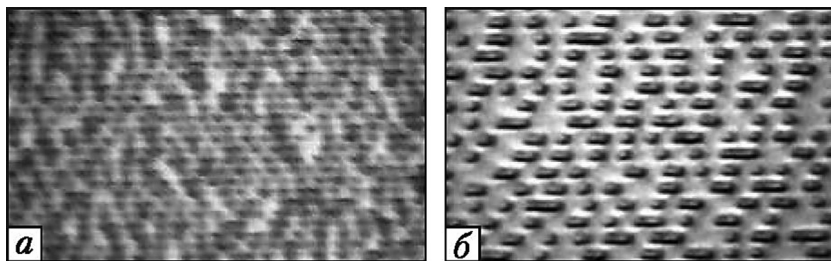


Рис. 3. Качество фокусирования системы: *a* – без компенсирующей поляризационной пластинки; *б* – с применением пластинки

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 сапфире 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 сапфира 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 °С. 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 стан-

дартной 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. 4).

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 x 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.

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!

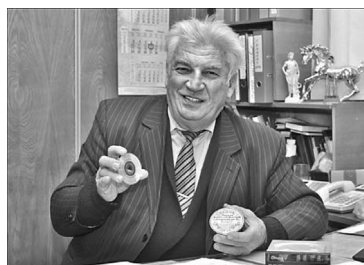


Рис. 4. Академик В. В. Петров демонстрирует первый в мире оптический диск на сапфире

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 прозвуча-

ло, 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 фотопленки 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 диски 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 широкомасштабного 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:

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

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

- высокое оптическое качество и однородность оптических свойств во всем объеме кристалла;
- возможность выращивания больших монокристаллов сапфира различных кристаллографических ориентаций, в том числе с ориентацией (0001) на поверхности, что невозможно для большинства из перечисленных методов;
- 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.

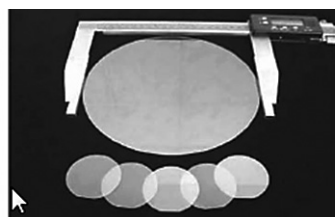
Очень важным при использовании изделий из сапфира, например в качестве оптических дисков для хранения, распространения и архивирования цифровой информации, является стабильность его характеристик во времени, оптическое и структурное качество материала, а также качество обработки поверхности. Поэтому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

вых 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. 5).

**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 $R_a < 2\text{Å}$
- 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

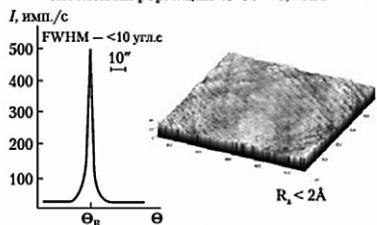


Рис. 5. Сапфировые диски для оптических носителей долговременного хранения информации

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. 6).

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



Рис. 6. Опытно-промышленный участок изготовления оптических сапфировых дисков

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 академика 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.

**Viacheslav V. Petrov, Andriy A. Kryuchyn, Semen S. Shanoilo,
Anatoliy S. Lapchuk, Yevhenii M. Morozov**

SAPPHIRE OPTICAL DISCS FOR LONG TERM DATA STORAGE

*Proc. of SPIE Vol. 9201 92010C-2, Optical Data Storage 2014.
Article ID 9201-OC. 9 p.*

Abstract. Results of implementation of technical solution for long term data storage technology on the basis of single crystal sapphire are presented. The effect of birefringence on the distribution of the focused laser beam through a uniaxial birefringent medium having a vertical orientation of the optical axis is analyzed. An expression for the calculation of the geometric aberrations of the focused laser beam in single-crystal substrate of the optical disc has been presented. It is shown that the problem of data reading through a substrate of negative single crystal sapphire can be solved by using for reading a special optical system with a plate of positive single crystal materials. The experimental results confirm the efficiency of the proposed technical solution.

Keywords: long term data storage, sapphire optical disc, birefringence, method of aberration compensation, optical compensating element

1. INTRODUCTION

One of the major problems facing mankind is the preserving and transmitting obtained knowledge to the succeeding generations. The optical discs have a great potential for long term archival storage. In this regard, special interest is the development and application of optical discs for the long term archival data storage. However, the existing optical discs can not provide the required level of reliability and data retention time due to the low stability of the polycarbonate substrate [1], and not sufficiently high its

adhesion to the metal layer. The variety of technical solutions is proposed for technology of long term data storage which is based on using highly stable materials for both substrate and recording medium. First designed and manufactured optical discs had a substrate of silica glass [2]. Their data retention time could not exceed of 20-30 years because of degradation with time of recording layer based on chalcogenide glasses [3]. The cermets are used as recording medium in long term optical M-discs of write-once format with shelf life of 150-160 years [4]. A borosilicate glass is proposed as medium of the disc substrate as well as refractory metals such as tungsten and platinum are proposed to use for recording layer. An embossed micro-structure on the surface is prepared by ion etching [5]. It is suggested to seal tungsten alloy disc by silicon nitride [6] and to read the information from platinum layer through sapphire windows [7]. The quartz is also proposed as substrate of optical disc for long term data storage [8]. The establishment of such data storage systems focuses on long term and reliable data storage, rather than getting the limit values of density and large amounts of data storage [5, 6, 8, 9].

Materials for the manufacture of optical discs having long term data storage time must be chemically, thermally and mechanically stable. The main element determining parameters of the optical disc is a transparent layer (substrate) through which the information is reading and recording layer on which information is recorded. Disc substrate is an external

Table 1. Physical and chemical properties of materials suitable for the manufacture of optical discs for long term data storage

| Parameters \ Material | Sapphire (Al ₂ O ₃) | Quartz (SiO ₂) | Fused quartz (SiO ₂) | Yttrium aluminum garnet (Y ₃ Al ₅ O ₁₂) | Magnesium aluminate (MgAl ₂ O ₄) | Diamond (C) |
|--|--|----------------------------|----------------------------------|---|---|------------------|
| State of matter | Crystalline | Crystalline | Amorphous | Crystalline | Crystalline | Crystalline |
| Optical type of crystal | Negative | Positive | – | – | – | – |
| Mohs hardness | 9 | 7 | 5,3 – 6,5 | 8,5 | 8 | 10 |
| Fusing temperature (K) | 2300 | 1960 | 1350 (softening) | 2210 | 2400 | 1100 (burn down) |
| Thermal conductivity coefficient <i>k</i> (W/(mK)) | ~34 | 3 | 1,3 | 14 | 15 | 3200 |
| Coefficient of linear thermal expansion $\alpha \cdot 10^{-6}$ (1/K) | 5,6 | 0,55 | 0,55 | 8,0 | 7,5 | 1,0 |
| Chemoresistance | 1* | 2* | 3* | 1* | 3* | 1* |
| Resistance to UV radiation | Not degraded | Not degraded | Degraded | Not degraded | Not degraded | Not degraded |

* Corresponding author: kryuchyn@ipri.kiev.ua

unprotected layer and it defines the types of materials and technologies that can be applied in the deposition of the recording layer, so the choice of the substrate medium is the key element in development of technology of long term data storage. Table 1 shows characteristics of the materials that can be used for manufacture of optical disc substrate. In Table 1 the following designations are used: 1 — soluble in concentrated solutions of fluoride salts (such as, BaF_2 , MgF_2 , PbF_2 , and oxides) at very high temperatures ($> 1000\text{ }^\circ\text{C}$); 2 — soluble in alkaline aqueous solutions at high temperatures ($> 300\text{ }^\circ\text{C}$) and solution of hydrofluoric acid; 3 — soluble in aqueous alkaline solutions and solution of hydrofluoric acid. From the Table 1 one can see that for long term data storage it is appropriate to apply a substrate from highly stable single crystal materials.

2. METHOD OF ABERRATION COMPENSATION IN SAPPHIRE OPTICAL DISC

The analysis of existing highly stable uniaxial single crystal materials has demonstrated that the best material for the optical disc substrate is leucosapphire [9, 10], on the internal surface of which the information micro relief structure is formed [5, 9, 10] since it has a high chemical stability, its wear resistance is 8 times greater than that of steel, it is thermally stable up to $1600\text{ }^\circ\text{C}$ and it is optically transparent in the range from 0.17 microns to 5.5 microns [11]. In addition, sapphire is the hardest material being made of cheap components, and technology for growing single crystals sapphire is simple and affordable process. The sapphire substrate on which information is recorded in the form of a microrelief structure, and the data are read through the sapphire substrate can be a key element of technology for optical data storage with high reliability and long shelf life [9, 10]. Thickness of the substrate may be 0.4-1.2 mm, which provides sufficient mechanical strength to the carrier.

The disadvantage of sapphire is its optical anisotropy (birefringence) and as a consequence, the complexity of the optical scheme for reading information in the sense of the aberrations compensation caused by the anisotropy. The sapphire birefringence causes the wavefront distortions of the scanning laser beam as it passes through the optical disc. This is caused by the difference in optical path of light rays with different polarization that makes impossible to use the standard optical system for information reproducing

from the optical disc with a birefringent sapphire substrate. The 0001 orientation of the axis of sapphire single crystal parallel to the optical axis of the optical head will result in a constant magnitude of aberrations during rotation of the optical disc. However the resolution of the optical system drops 4.3 times for the case of CD with sapphire substrate due to birefringence. The resolution falls further with an increase of numerical aperture. Accordingly, the use of the birefringent single crystal sapphire as substrates for optical discs requires a change of standard optical readout system to compensate the aberrations created by rays with different polarization. This minimization of the polarization effect can only be applied to those optical discs manufactured from uniaxial birefringent sapphire with the optical axis orthogonal to the disc surface.

Sapphire substrates have significant birefringence Δn_{spf} ($n_o = 1.780$, $n_e = 1.772$, $\Delta n_{spf} = n_e - n_o = -8 \cdot 10^{-3}$ at $\lambda = 442$ nm), which leads to significant aberrations when focusing the laser radiation through the sapphire substrate of optical disk. Phase distortions of extraordinary wave (p-polarized) occur when the focused laser beam falls on single crystal sapphire substrate. The wavefront distortion can be calculated by formula [12]

$$\Delta\Phi_p = \frac{2\pi}{\lambda} H \frac{x^2}{\sqrt{1-x^2} \left(\frac{NA}{n}\right)^2} \left(\frac{NA}{n}\right)^2 \delta n = \frac{2\pi}{\lambda} H \left[\left(\frac{NA}{n} x\right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{NA}{n} x\right)^4 + \frac{3}{8} \left(\frac{NA}{n} x\right)^6 \right] \delta n \quad (1)$$

where NA is numerical aperture of objective lens, $x = r/r_0$. From Eq. (1) one can see that phase distortions are superposition of astigmatism and spherical aberrations of various orders. In Eq. 1 is assumed that birefringence is small so it changes only the phase velocity but not direction of propagation of beam in birefringence layer. For large birefringence the Eq. 1 should be corrected. The first main term in Eq. (1) represents polarization stipulated astigmatism aberration. This aberration results in that the s- and p-polarized light will be focused at a different depth. The distance between focal points of the two beams is defined as follows [12, 13]:

$$\Delta F = 2H\Delta n/n_0, \quad (2)$$

where H is the thickness of optical carrier substrate. From Eq. (1) follows that the distance between two focused spots (spots of s- and p-polarized

beams) is in several times larger than the depth of focus of readout optical system. Analysis of Eq. (1) has shown that the astigmatic aberrations caused by the anisotropy of the sapphire substrate can be compensated by using an additional compensating plate with a positive uniaxial material (opposite to the sapphire). Hence the first main condition for compensation plate is that it should have birefringence of opposite sign to birefringence of substrate. Schematic representation of the method of compensation of aberrations is shown in Fig. 1-4. From Eq. (1) follows that higher order aberration depends on parameter NA/n , and in the case of large difference in that parameter the higher order aberrations would not be well compensated. Therefore the best compensation scheme of aberration caused by substrate birefringence would be obtained when this parameters for optical substrate and compensation plate are approximately equal. Accordingly, the second main condition on medium of compensating plate of optical readout system is that the refractive index of the compensating plate should be approximately equal to the refractive index of the substrate of the optical carrier n_{sub} .

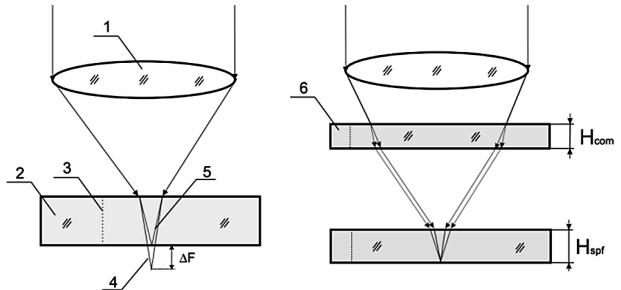
Focusing laser beam passed through iniaxial layer aquires spherical and astigmatism aberreaion. In the case of using standart readout optical system the beam passing through sappfier and compensation plates should have the same spherical aberration as beam passing through polycarbonate layer of standart optical disk. This condition can be written as follows:

$$\frac{n_{plc}^2 - 1}{8n_{plc}^3} NA_1^4 \frac{H_{plc}}{\lambda} = \frac{n_{spf}^2 - 1}{8n_{spf}^3} NA_1^4 \frac{H_{spf}}{\lambda} + \frac{n_{com}^2 - 1}{8n_{com}^3} NA_2^4 \frac{H_{com}}{\lambda}, \quad (3)$$

where n_{plc} is refractive index of polycarbonate, H_{plc} is thickness of polycarbonate substrate, n_{spf} is average value of the refractive index of sapphire

Fig. 1. Schematic representation of aberration compensation:

- 1 – objective lens,
- 2 – sapphire substrate,
- 3 – optical axis,
- 4 – extraordinary ray,
- 5 – ordinary ray,
- 6 – compensating plate

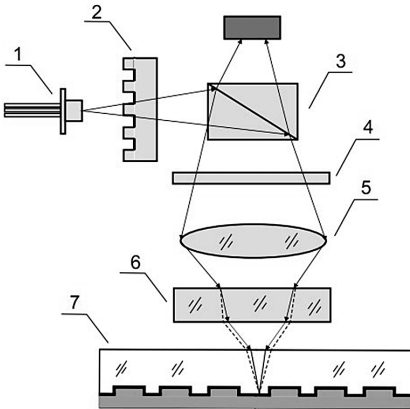


between the ordinary and extraordinary rays, H_{spf} is thickness of sapphire substrate, n_{com} is average value of the refractive index between ordinary and extraordinary rays for the material used for the manufacture of the compensating plate, H_{com} is thickness of compensating plate, NA_1 is numerical aperture in region behind the objective, NA_2 is numerical aperture in the region where compensating plate is placed, λ is wavelength of laser radiation. Condition of astigmatism aberration compensation in general form can be written as:

$$\Delta\Phi = \Delta\Phi_1 + \Delta\Phi_2 = NA_1^2 \frac{H_{spf}}{n_{spf}^2} \Delta n_{spf} + NA_2^2 \frac{H_{com}}{n_{com}^2} \Delta n_{com} = 0, \quad (4)$$

where Δn_{spf} and Δn_{com} are differences of the refractive indices for the extraordinary and ordinary rays of sapphire and material of compensating plate, respectively. Fig. 2 shows a modified optical scheme of readout system. The modified optical scheme differs from the standard scheme by an additional compensating plate 6, which is situated between the lens and the carrier. During the data reproducing the laser beam emitted by a laser diode (1) passes through the diffraction grating (2), a quarterwave plate (4) and the beam splitter cube (3) to an objective lens (5). The objective lens focuses the laser beam through compensating plate (6) and media substrate (7) to the relief structure of information media. Presence of single crystal compensating plate leads to the fact that ordinary and extraordinary beams are focused at the same plane.

It is not always possible to insert compensation plate between objective lens and substrate of optical disk. In this case different optical schemes for birefringence related aberration compensation is required. Fig. 3 shows the modified optical scheme of readout system in which compensating plate is placed between diffraction grating and the beam-splitting mirror. During data reproduction, the laser beam from a laser diode (1) passed through the



lens and substrate of optical disk. In this case different optical schemes for birefringence related aberration compensation is required. Fig. 3 shows the modified optical scheme of readout system in which compensating plate is placed between diffraction grating and the beam-splitting mirror. During data reproduction, the laser beam from a laser diode (1) passed through the

Fig. 2. Modified optical scheme of readout system

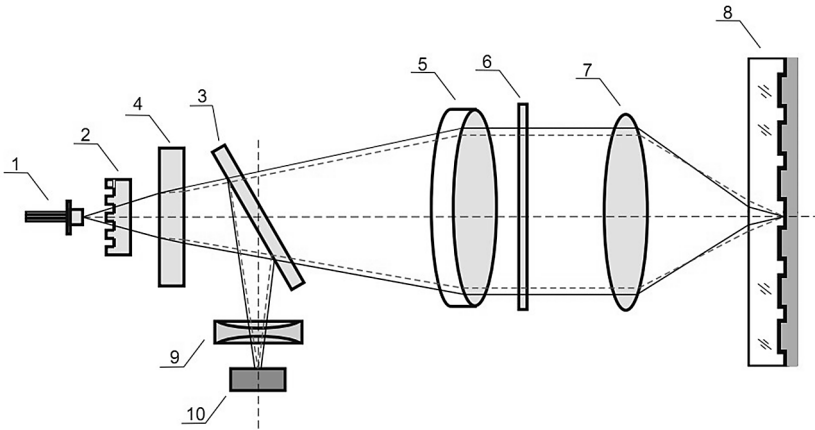


Fig. 3. Modified optical scheme of readout system in which compensating plate is placed between diffraction grating and beam-splitting mirror: 1 – laser diode, 2 – diffraction grating, 3 – beam-splitting mirror, 4 – compensating plate, 5 – collimating lens, 6 – quarter-wave plate, 7 – objective lens, 8 – optical disc, 9 – cylindrical lens, 10 – photodetector

diffraction grating (2), compensating plate (4), beam-splitting mirror (3), collimating lens (5) and quarterwave plate (6) and is directed onto the focusing objective lens (7). The focusing lens focuses the laser beam through a carrier substrate (8) on the microstructure relief of information layer. The presence of a compensating plate (4) made of uniaxial single crystal material leads to the compensation of optical path difference between s- and p-polarized rays and focusing them in one focal plane in sapphire substrate (8). Because the modulated laser beam does not pass on the back way through the compensating plate (4) on the photodetector (10) is irradiated by astigmatic laser beam due to the birefringence of the sapphire substrate.

Fig. 4 shows another modified optical scheme of readout system in which compensating plate is placed between beam-splitting mirror (3) and collimating lens (5). In this optical scheme correctly focused beam illuminates the photodetector (10) because the laser beam pass through the compensating plate (4) also on the way back back from optical disk. Deviations of the extraordinary ray when it propagates through the optical disc substrate is compensated by deviations in the opposite direction when it passing through the compensating plate. This makes it possible to reduce the influence of birefringence in optical carrier substrates to a minimum.

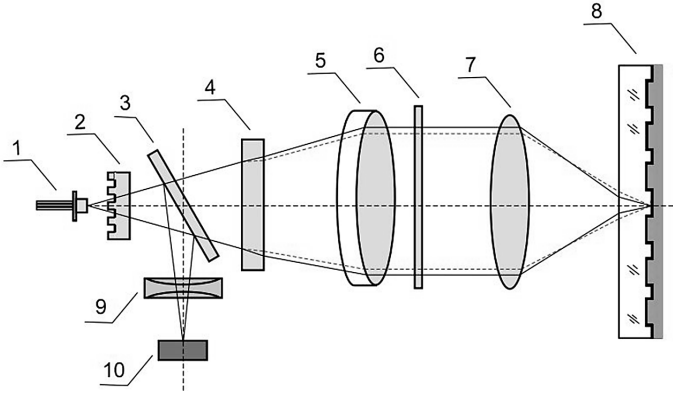


Fig. 4. Modified optical scheme of readout system in which compensating plate is placed between beam-splitting mirror and collimating lens: 1 – laser diod, 2 – diffraction grate, 3 – beam-splitter mirror, 4 – compensating plate, 5 – collimating lens, 6 – quarter-wave plate, 7 – objective lens, 8 – optical disc, 9 – cylindrical lens, 10 – photodetector

It should be noted that the divergence angle of the laser diode beam is not large and hence numerical aperture NA_2 is usually significantly smaller than outout numerical aperture NA_1 of objective lens. Hence the parameter NA/n at compensation plate also would be significantly smaller than at substrate of optical disk. That fact results to the small compensation of higher orders aberrations in these optical schemes. Therefore the quality of aberration compensation in optical schemes shown on Fig. 3 and Fig. 4 would be worse that that of optical scheme on Fig. 2.

Table 2 shows examples of single crystal materials which can be used to manufacture of the optical media substrate and the compensating plates. The positive single crystal quartz ($n_o = 1.544$, $n_e = 1.553$, $\Delta n_{kvr} = n_e - n_o = -9 \cdot 10^{-3}$) is best choice for the medium of the compensating plate in optical scheme shown on Fig. 2 since it has rirfractive index close to refractive index of sappiere and its birefringence is not large and approximatly equals to that of sapphire. The condition for astigmatism aberration compensation in this case can be written as:

$$\frac{H_{spf}}{n_{spf}^2} \Delta n_{spf} + \frac{H_{kvr}}{n_{kvr}^2} \Delta n_{kvr} = 0, \quad (5)$$

where H_{kvr} is the thickness of quartz compensating plate.

Table 2. Examples of single crystal materials which can be used to manufacture of the optical media substrate and the compensating plates

| Material | Parameters | | |
|--|------------|-------|------------------------|
| | n_o | n_e | $\Delta n = n_e - n_o$ |
| Sapphire (Al_2O_3) | 1,765 | 1,757 | -0,008 |
| Single crystal quartz (SiO_2) | 1,542 | 1,551 | +0,009 |
| Orthovanadate (YVO_4) | 1,993 | 2,212 | +0,219 |
| Rutile (TiO_2) | 2,574 | 2,860 | +0,286 |
| Zircon (ZrSiO_4) | 1,960 | 2,015 | +0,055 |

Conditions for obtaining optical system with minimal residual aberrations for CD on the basis of high-stable single crystal sapphire substrate and single crystal quartz compensating plate (optical scheme on Fig. 2) can be written as [13]:

- 1) $H_{kvr} / H_{spf} = 0.62-0.72$,
- 2) $H_{kvr} + H_{spf} = H_{sum} \pm 5 \%$,
- 3) $|n_{com} - n_{sub}| < 0.3$,

where H_{sum} is thickness of the polycarbonate substrate. The first condition is condition of the astigmatism compensation, the second is condition that spherical aberration of optical scheme with compensation plate is the same as polycarbonate substrate (it is approximate condition), the third is condition of large and sufficient for optical recording compensation of higher-order aberrations.

Table 3 shows examples of constructional parameters (thickness) of the disc with sapphire substrate and quartz compensating plate for different formats of optical data storage.

Table 3. The thickness of sapphire and quartz layers for various formats optical discs

| Type of media | The thickness of sapphire substrate (mm) | The thickness of quartz plate (mm) | Uncompensated aberration $\Delta\Phi/\Phi_0$, 100 % |
|--|--|------------------------------------|--|
| CD | 0,714 | 0,486 | 1 |
| DVD | 0,357 | 0,243 | 1,6 |
| CD (for reading at a wavelength of $\lambda = 400$ nm) | 0,714 | 0,486 | 0,3 |

In the case of using standard optical information reading system the total thickness of quartz compensating plate and the sapphire substrate to be approximately equals (condition 2) to the thickness of the polycarbonate substrate [13]. This condition is not rigorous, but it is sufficiently precise for the engineering calculations of the optical system.

It should be noted that in the case of DVD-format the compensating quartz plate is very thin, which can lead to a reduction of reliability of data storage and causes difficulties during its manufacture. It was suggested to solve this problem by using optical schem shown on Fig. 3 or Fig. 4: 1) choose a material with a higher value of birefringence Δn_{com} and 2) place the compensating plate in that part of the optical scheme, which has a smaller value of numerical aperture $NA_2 = 0.107$ (in DVD format numerical aperture NA_2 is 0.6 at the point behind the lens) .

Table 4 shows examples of single crystal materials with a higher Δn_{com} which can be used to manufacture of the compensating plates.

Table 4. Examples of single crystal materials which can be used to manufacture of the compensating plates ($\lambda = 650$ nm)

| Material | Parameters | | |
|---|------------|-------|------------------------|
| | n_o | n_e | $\Delta n = n_e - n_o$ |
| Yttrium orthovanadate (YVO ₄) | 1,993 | 2,212 | + 0,219 |
| Rutile (TiO ₂) | 2,574 | 2,86 | + 0,286 |
| Zircon (ZrSiO ₄) | 1,96 | 2,015 | + 0,055 |

For example, in the case of sapphire substrate and yttrium orthovanadate compensating plate the condition of spherical aberration compensation when reading at $\lambda = 650$ nm can be written as:

$$1 = 1,68H_{spf} + 0,00163H_{YVO_4}, \quad (7)$$

where H_{YVO_4} is the thickness of yttrium orthovanadate compensating plate. The condition of astigmatism aberration compensation in this case ($NA_2 = 0,107$) can be written as:

$$H_{YVO_4}/H_{spf} = 1,59 . \quad (8)$$

Table 5 shows the values of the thickness of sapphire substrate and compensating plate, depending on the materials used and the reading parameters (reading at a wavelength λ is 650 nm).

Table 5. Constructional parameters (thickness) of the sapphire substrate and compensating plates

| Numerical aperture NA_2 | Constructional parameters | | | | |
|---------------------------|--|--|------------------|------------------|--------------------|
| | Thickness of the sapphire substrate (mm) | Thickness of the compensating plate (mm) | | | |
| | | SiO ₂ | YVO ₄ | TiO ₂ | ZrSiO ₄ |
| 0,107 | 0,58 | 12,45 | - | - | - |
| 0,1 | 0,58 | 14,29 | - | - | - |
| 0,107 | 0,59 | - | 0,94 | 1,23 | 3,49 |
| 0,1 | 0,59 | - | 1,11 | 1,35 | 3,99 |

It should be noted that in the case of using first compensation scheme with yttrium or-thovanadate plate for DVD ($NA = 0.6$) its thickness H_{YVO_4} is 0.03 mm which is difficult to manufacture. However this scheme gives significantly better compensation of aberration caused by birefringence in optical carrier substrates.

3. EXPERIMENTAL RESULTS

The information (in a standard CD-ROM format) was recorded (at 2X speed) on photo-resist layer with thickness of 150 nm deposit on sapphire disc having a thickness of 0.7 mm and a diameter of 80 mm by audio recording laser station established at the Institute for Information Recording of NAS of Ukraine. A single-mode semiconductor laser QLD-405-100S (405 nm, 100 mW) was used as a source of coherent light. Power of the laser beam at the output of the lens was 3 mW. Etching time of the photoresist layer in an alkaline etchant consisted 7 seconds. A modified optical ROM drive Plextor PX-891 SA was used for the optical system test. Reading was performed according to the optical scheme shown in Fig. 2. The standard reading device modification is consisted in fixing a compensating quartz plate (with vertical orientation of optical axis) having a size 5x5x0.5 mm to the objective lens by gluing method.

The results of test pointed out that the quartz compensating plate allows a robust data retrieving in the case of reading data through sapphire substrate by a standard optical drive. Figure 5 demonstrates the result of test obtaining by Nero CD-DVD Speed program, from which one can see that the disc

does not have uncorrectable errors C2, but there are small numbers of correctable errors C1.

The experiment has pointed out the possibility of full compensation of polarization stipulated wave front distortion of the sapphire substrate. The individual method of sapphire substrates manufacture allows obtain more accurate substrate thickness than in injection molding process of polycarbonate optical discs. The transparency of sapphire in the ultraviolet range allows using shorter wave radiation for recording and reproducing information.

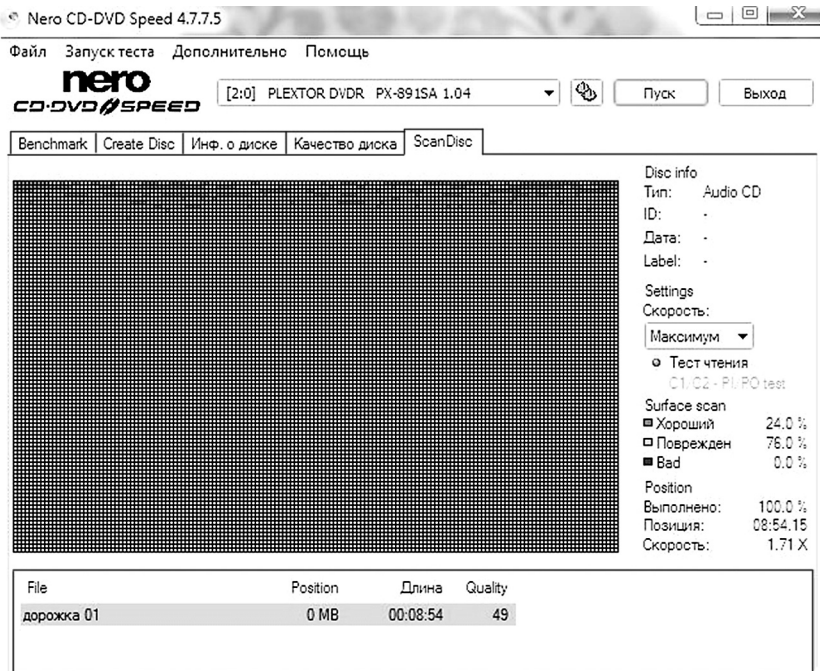


Fig. 5. The results of the test of retrieving data through sapphire substrate reading out by modified standard reading device. The results obtained by Nero CD-DVD Speed program

4. CONCLUSIONS

1. It has been considered the effect of birefringence on the distribution of the focused laser beam through a uniaxial birefringent medium having a vertical orientation of the optical axis. An expression for the calculation of the geometric aberrations of the focused laser beam in single-crystal substrate of the optical disc has been presented.

2. The permissible levels of the anisotropy were calculated for optical discs of different formats allowable thickness discs of different formats and the maximum thickness of sapphire optical discs in which there is no significant signal distortion have been demonstrated.

3. The method of compensating aberrations when reading data from uniaxial birefringent medium was developed. The basic parameters of reading out system for the sapphire disc with a vertical optical axis orientation were calculated. The structural parameters (thickness) of the optical disc sapphire substrate and quartz compensating plate of different formats were presented.

4. An experimental verification of the method of the aberrations compensations which showed that the quality of images obtained through the glass and sapphire plate with compensation, virtually identical has been performed. Thus, the application of the compensating quartz plate further allows read information from the optical sapphire disc for information retention.

REFERENCES

1. Nikles, D. E., Wiest, J. M., "Accelerated aging studies and the prediction of the archival lifetime of optical disc media," Proc. SPIE 3806, 30-36 (1999).
2. Petrov, V. V., Gorshkov, N. V., "Optical disk as a unique information media for controlling systems," XI Vsesirniy nauchno-technicheskiy congress, 1-21 (1977).
3. Petrov, V. V., Kryuchin, A. A., Gorbov, I. V., Kossko, I. O., Kostyukevych, S. O., "Analysis of properties of optical carriers after long-term storage," Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics 12(4), 399-402 (2009).
4. Access point: <http://www.ritek.com/m-disc/eng/download/001.pdf> [Electronic Resource].
5. Ukrainian Patent #73611, G11B 7/254 (2011).

6. Vries, J., Schellenberg, D., Abelman, L., et al., "Towards Gigayear Storage Using a Silicon-Nitride/Tungsten Based Medium," ArXiv.org: 1310.2961v1 (2013).
7. Access point: <http://news.sciencemag.org/sciencenow/2012/07/a-million-year-hard-disk.html> [Electronic Resource].
8. Zhang, J., Beresna, M., Kazansky, P., "5D Data Storage by Ultrafast Laser Nanostructuring in Glass," CLEO: Science and Innovations paper: CTh5D.9 (2013) (http://dx.doi.org/10.1364/CLEO_SI.2013.CTh5D.9).
9. Ukrainian Patent #73611, G11B 7/254 (2005).
10. Petrov, V. V., Kryuchyn, A. A., Gorbov, I. V., et.al., "Opticheskie diski dlya dolgovremennogo hraneniya informatsii," *Nanosistemy, nanomaterialy, nanotekhnologii* 7(3), 825-832 (2009) [in Russian].
11. Dobrovinskaya, E. R., Lytvynov, L. A., Pishchik V., [Sapphire: Material, Manufacturing, Applications], Springer Science + Business Media, Philadelphia (2009).
12. Stallinga S. "Axial birefringence in high-numerical-aperture optical systems and the light distribution close to focus," *J. Opt. Soc. Am. A.* 18 (11), 2846-2859 (2001).
13. Petrov, V. V., Semynozhenko, V. P., Puzikov, V. M., Kryuchyn, A. A., Lapchuk, A. S., Morozov, Ye. M., Borodin, Y. O., Shyhovets, O. V., Shanoylo, S. M., "Method of aberration compensation in sapphire optical disks for long term data storage," *Functional Materials* 21(1), 105-111 (2014).

**V. V. Petrov, V. P. Semynozhenko, V. M. Puzikov, A. A. Kryuchyn,
A. S. Lapchuk, Ye. M. Morozov, Y. O. Borodin, O. V. Shyhovets**

THE METHOD OF ABERRATION COMPENSATION FOR LONG TERM DATA STORAGE SAPPHIRE MEDIA

Functional Materials. 2014. Vol. 21. No. 1. P.105-111.

Abstract. One of the actual problems today is the creation of long term data storage systems. This paper presents the research results that allow implementing technical solution proposed by the authors of this work a few years ago to create long term storage optical discs based on single crystal sapphire. It is shown that the problem of data reading through the anisotropic substrate can be solved by using single crystal optical compensating elements. The experimental results confirm the efficiency of the proposed method of aberration compensation for long term data storage sapphire media.

Keywords: single crystal sapphire, optical sapphire disc, long term data storage, method of aberration compensation, optical compensating element.

1. INTRODUCTION

Optical discs are widely used in data storage for storage, dissemination and archiving digital information. In nowadays particular special interest is the application of optical disk for the long-term archival data storage. However, the existing optical discs can't provide the required level of reliability and data storage time due to the low stability of the polycarbonate substrate [1], and insufficiently strong adhesion of a metal layer with a polycarbonate substrate. To solve the problem of long-term storage is proposed to use a variety of technical solutions, which are based on the using highly stable materials for the recording media and the media substrate.

In optical write-once discs for long-term storage (storage period is 150-160 years), so-called M-drives offered used cermets as recording medium

[2]. It is proposed to use a borosilicate glass, an relief microstructure on the surface is obtained by ion-beam etching [3], refractory metals such as tungsten and platinum. Silicon nitride is proposed to seal tungsten discs [4], and information from platinum substrates read through the sapphire windows [5]. To create optical media for long term storage is also proposed to use quartz substrates [6].

For long-term data storage it is appropriate to apply a substrate from highly stable single crystal materials [7]. However, most of single crystal materials have a significant anisotropy which manifests himself in optics as birefringence. The birefringence cause aberration distortion of scanning beam as it passes through the optical disc due to the difference in the path of rays of light with different polarization. Presence of polarization aberration makes it impossible to use standard reading systems for reproducing information from an optical disc with single crystal substrate. Therefore, the use of single crystal materials as substrates of optical discs for long-term data storage requires optical system modification to compensate the arising geometric aberrations. Investigation of existing highly stable uniaxial single crystal materials showed that the best material for optical disk substrate is leucosapphire [7] since it has high chemical stability; its wear resistance is 8 times more than of steel, sapphire is thermally stable up to 1600 °C and is optically transparent in the range from 0.17 microns to 5.5 microns [8]. In optical recording systems can be applied only optical uniaxial birefringent discs, the optical axis of which is orthogonal to the disk surface.

This paper describes the aberration compensations of an information reading system from an optical disc substrate which is made of uniaxial optical single crystal material, the optical axis of which is orthogonal to the substrate surface. The developed method of aberration compensation was applied to the long term sapphire optical disc and the basic parameters of optical system for reading information and optical disk are evaluated. Experimental verification of the developed method was carried out.

2. THEORETICAL BACKGROUND AND CALCULATIONS

2.1. The propagation of laser focused beam through anisotropic medium

Let us consider the propagation of a focused laser beam through a single crystal substrate (Fig. 1). We assume that 1) the crystal optical axis is oriented

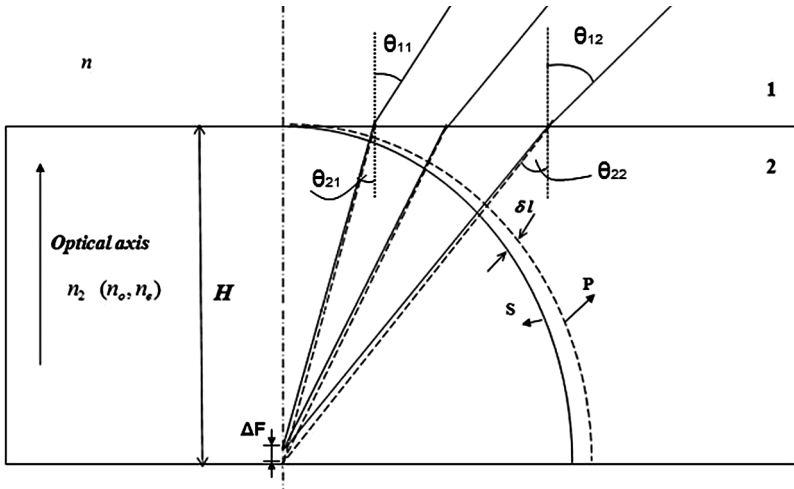


Fig. 1. Propagation of laser focused beam through a monocrystal substrate

orthogonally to the substrate surface and 2) reading and recording processes are performed using standard objective lens of optical device of specified format (CD, DVD and BluRay). These standard optical objective lenses compensate the spherical aberration of the substrates of standard format disk, which do not have optical anisotropy.

Let us consider the difference between the optical paths for s- and p-polarized light beams, the value which characterizes the amount of aberration caused by birefringence. The aberration is due to the fact that at obliquely incident on the disk s- and p-polarized beams have different phase velocity. The value of difference between optical paths of the s- and p-polarized light (polarization aberration) will increase with increasing the angle of beam spreading θ_{11} . Another feature of the beam focused into birefringent plate is that the division of light on the s- and p-polarization is local. That is the amplitudes of the s- and p-polarizations are functions of the coordinates on the surface of the lens and the polarization of the laser beam. Incident optical radiation with a fixed polarization may be either s- or p-polarized depending on place where it falls onto the lens (with respect to the lens surface). In this connection arising aberrations can be compensated only by optical elements which are sensitive to the light polarization, that is, by elements with optical anisotropy.

Dispersion of anomalous beam (p-polarized) can be written as [9]:

$$n_p = \frac{n_0}{\sqrt{1 + \frac{(n_0^2 - n_e^2)}{n_e^2} \sin^2 \theta_{21}}}, \quad (1)$$

where n_0 is index of refraction of the ordinary ray, n_e is the index of refraction of the extraordinary ray (see Fig. 1).

Normal beam has no dispersion and therefore:

$$n_s = n_0. \quad (2)$$

Difference between optical paths of s- and p-polarized beams, as shown Fig. 1, can be written as [10]:

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_p &= \frac{H}{\cos\theta_{21}}(k_1 - k_2) = \frac{2\pi}{\lambda} H \frac{\sin^2 \theta_{21}}{\cos\theta_{21}} \Delta n = \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} H \frac{\frac{\sin^2 \theta_{21}}{\sin^2 \theta_{22}}}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_{21}}{\sin^2 \theta_{22}} \sin^2 \theta_{22}}} \sin^2 \theta_{22} \Delta n = \frac{2\pi}{\lambda} H \frac{x^2}{\sqrt{1 - x^2 \left(\frac{NA}{n_2}\right)^2}} \left(\frac{NA}{n_2}\right)^2 \Delta n = \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} H \left[\left(\frac{NA}{n_2} x\right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{NA}{n_2} x\right)^4 + \frac{3}{8} \left(\frac{NA}{n_2} x\right)^6 + \dots \right] \Delta n, \quad (3) \end{aligned}$$

where k_1 is wave vector of the extraordinary ray, k_2 is wave vector of the ordinary ray, H is thickness of the substrate, Δn is difference in the refractive indices of the ordinary and extraordinary rays in the substrate material ($\Delta n = n_0 - n_e$), NA is numerical aperture ($NA = n_2 \sin\theta_{22}$), is refractive index of the substrate, $x = (\sin\theta_{21}/\sin\theta_{22})$.

Formula (3) shows that the phase distortion has a complex dependence on the angle of incidence and represents a superposition of astigmatism and spherical aberrations of different orders. The first term is most significant in formula (3). It determines the difference in focal length of s- and p-polarized light beams (astigmatism) that leads to the two focused light spots. From Eq. (3) follows that the distance between the centers of the light spots of s- and p-polarized beams is:

$$\Delta F = 2H\Delta n/n_2. \quad (4)$$

Fig. 2 shows distribution of the intensity of the laser beam in the meridional plane for different values of the anisotropy [10]. From these graphs we can see that a small anisotropy blurs light spot and its blurriness increases with an increase of anisotropy and the thickness of the substrate. For large values of the anisotropy, when the distance between the centers of the spots is comparable to the depth of focus ($\Delta F \geq \lambda n_2 / NA^2$), there are two light spots formed by light beams with different polarization.

To determine allowable values of the anisotropy of the sapphire substrate ($|\Delta n = n_o - n_e|$) at which the focused laser beam is a diffraction limited (a necessary condition for the optical system of optical information recording

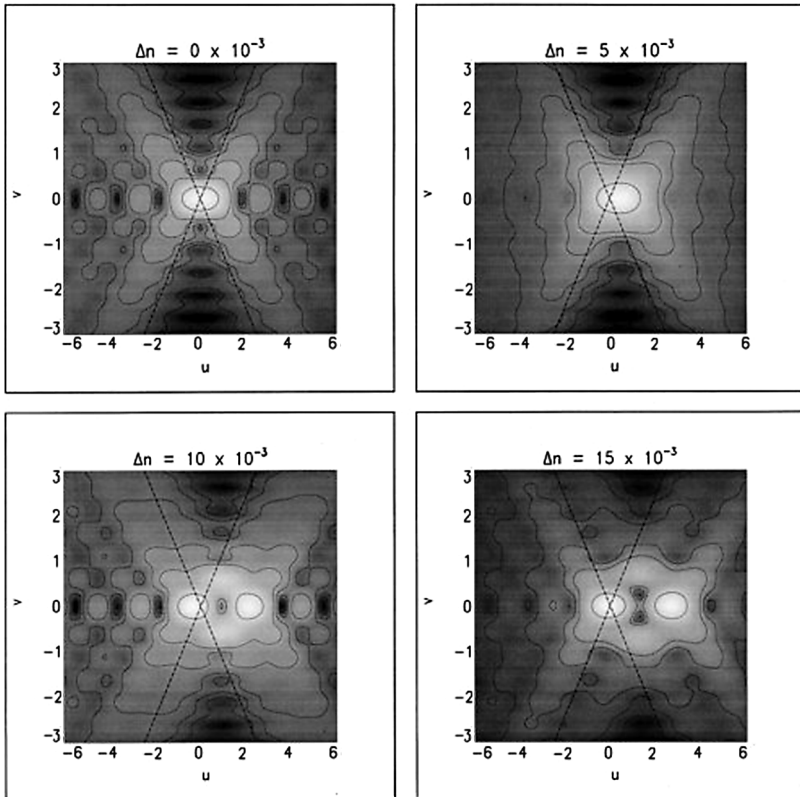


Fig. 2. The intensity of the laser beam in the meridional plane of the anisotropy

device) the dependence of the light intensity at the center of the light spot on the magnitude of Δn for optical disc CD, DVD and BD formats was simulated. Strehl ratio was chosen as a criterion of diffraction limited optical system. We also evaluate the possibility of using the optical system with a laser having wavelength of $\lambda = 405$ nm and numerical aperture of $NA = 0,26$ for reading a data in CD format through sapphire substrate. Simulation results are shown in Table 1.

Table 1. The permissible level of anisotropy for different optical disc format

| Type of media | λ | NA | n_0 | max Δ | 10% max Δ | Δ |
|---------------|-----------|------|-------|---------------------|---------------------|-------------------|
| CD | 780 | 0,45 | 1,78 | $2,5 \cdot 10^{-3}$ | $7,3 \cdot 10^{-4}$ | $8 \cdot 10^{-3}$ |
| DVD | 650 | 0,60 | 1,78 | $2,4 \cdot 10^{-3}$ | $7,1 \cdot 10^{-4}$ | $8 \cdot 10^{-3}$ |
| BD | 400 | 0,85 | 1,78 | $2,7 \cdot 10^{-3}$ | $7,9 \cdot 10^{-4}$ | $8 \cdot 10^{-3}$ |
| CD/BD | 400 | 0,26 | 1,78 | $3,1 \cdot 10^{-3}$ | $8,8 \cdot 10^{-4}$ | $8 \cdot 10^{-3}$ |

In Table 1 $\max \Delta n_0$ is maximum possible deviation of the refractive index to have diffraction limited optical system. From the presented data it is clear that any formats can not use a sapphire substrate having an orthogonal orientation of the optical axis to the surface of the disc directly without additional compensation system, because this leads to aberrations which greatly exceed the permissible value $\max \Delta n_0$.

Also spherical aberration occurs at the propagation of a focused laser beam through an optical disc due to the difference in refractive index of sapphire and polycarbonate. It is known that the plane-parallel layer introduces spherical aberration into the passing therethrough it light beam. The amount of spherical aberration can be calculated by the formula [9]:

$$\frac{\delta l_1}{\lambda} = \frac{n_0^2 - 1}{8n_0^3} NA^4 \frac{H}{\lambda} r^4 . \quad (5)$$

From (5) one can see that the magnitude of aberration depends on the refractive index as a function $(n_0^2 - 1)/8n_0^3$, whose graph is shown in Fig. 3.

Since sapphire and polycarbonate have different indices of refraction ($n_{0spf} = 1,78038$, $n_{0plc} = 1,58$), then the sapphire disk should have different from polycarbonate disk thickness to have the same spherical aberration (for using standard optical system for reading information). From the graph it

can be seen that at the $n = 1,7$ the spherical aberration has broad maximum and weakly depends on the refractive index and so one can be expected only slight differences in the magnitude of spherical aberration for the two disks with the thickness.

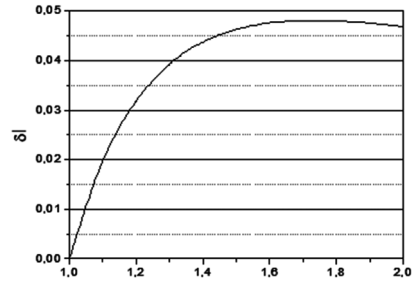


Fig. 3. The dependence of the spherical aberration δl on the refractive index n_2

2.2. Method for compensating aberrations of focused laser beam

Let us consider a possibility of compensation of the aberration due to anisotropic disc medium (uniaxial crystal with an orthogonal orientation of the optical axis to the disk surface) by an additional layer of a uniaxial material and having a vertical orientation of optical axis. The resulting aberration is total aberration of each layer and therefore may be expressed from (3) as follows:

$$\Delta\Phi = \Delta\Phi_1 + \Delta\Phi_2 = kx^2 NA^2 \left(\frac{H_1}{n_1^2} \Delta n_1 + \frac{H_2}{n_2^2} \Delta n_2 + \right. \\ \left. + NA^2 \left(\frac{H_1}{n_1^4} \Delta n_1 + \frac{H_2}{n_2^4} \Delta n_2 \right) + \dots \right), \quad (6)$$

where H_1 and n_1 are thickness and refractive index of the additional layer respectively, H_2 and n_2 are thickness and refractive index of the disc substrate respectively. From formula (7) you can see that in the case of using standard objective lens the substrate aberration can be considerably compensated if the additional layer has a refractive index value n_o , n_e inverse to the refractive indices of sapphire. If the substrate material of optical disc and material of additional layer are close in value of the index of refraction for the ordinary ray n_o , you can actually achieve total compensation for aberration caused by the anisotropy of the disk substrate. Otherwise, the compensation will be partial. Investigation of available transparent uniaxial optical crystals showed that the best material for compensating of sapphire substrate aberrations is quartz, which has the following indices of refraction: $n_o = 1,5443$, $n_e = 1,5534$. Schematic representation of the compensation method of aberrations is shown in Fig. 4.

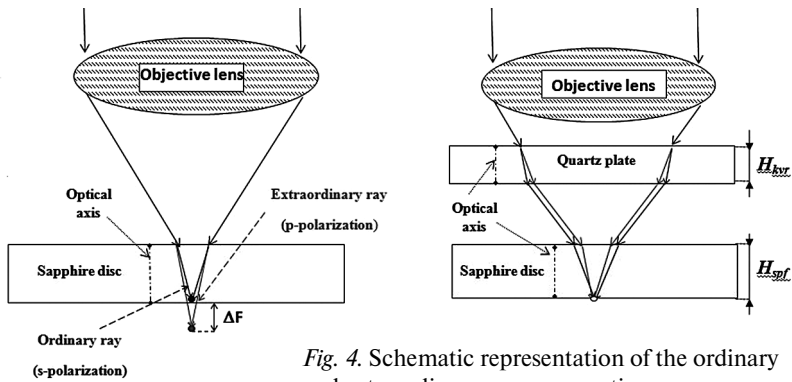


Fig. 4. Schematic representation of the ordinary and extraordinary rays propagation

In the case of using standard optical information reading system (information is recorded in CD-format) relative value of spherical aberration of sapphire disc with quartz compensator having the same thickness as polycarbonate layer can be calculated as follows formula:

$$\frac{\frac{\delta l_{spf}}{\lambda} - \frac{\delta l_{plc}}{\lambda}}{\frac{\delta l_1}{\lambda}} = 0,0073, \quad (7)$$

from which is clear that difference is small and sum of quartz and sapphire disk should be equal to thickness of polycarbonate disk. Table 2 shows the permissible value of thickness of substrate for different disc formats and the maximum thickness of the sapphire optical disc in which there will be no significant distortion of the signal due to the high orders spherical aberration of the focused reading beam.

Table 2. The values of spherical aberration for sapphire and polycarbonate layers

| Type of media | λ | NA | $\pm H$, μm | The maximum value of H for which sapphire can be replaced by polycarbonate, mm |
|---------------|-----------|------|-------------------------|--|
| CD | 780 | 0,45 | 100 | 10 |
| DVD | 650 | 0,6 | 30 | 3 |
| BD | 400 | 0,85 | 3 | 0,3 |
| CD/BD | 400 | 0,26 | 900 | 90,0 |

The data show that an increase of numerical aperture NA leads to a rapid increasing of value of high order spherical aberrations. It imposes rigorous limitations on the possible thickness of BD format optical disc, which can have sufficient compensation level of aberrations for optical recording by quartz plate. From data above you can see also that the difference of spherical aberration for sapphire and polycarbonate discs is negligible for layer thickness of standard optical disk and therefore does not impose additional restrictions on the use of sapphire as a material for optical disk substrates.

Thus the conditions for obtaining composite layer (sapphire and quartz layers) with minimal residual aberrations can be written as

$$\begin{aligned} 1) & H_{kvr} / H_{spf} = 0.62-0.72; \\ 2) & H_{kvr} + H_{spf} = H_{sum} \pm 5 \%; \\ 3) & |n_{com} - n_{sub}| < 0.3, \end{aligned}$$

where H_{kvr} and H_{spf} are thickness of quartz and sapphire layers respectively, n_{com} and n_{sub} are refraction index of compensating plate and disc substrate respectively. The first condition is condition of the astigmatism compensation (the first term of formula (3)), the second is condition for compensation of spherical aberration of plane-parallel substrate (the second term of formula (3)), the third is condition for sufficient for optical recording compensation of higher-order aberrations, H_{sum} is thickness of the polycarbonate substrate.

Table 3 shows examples of constructional parameters (thickness) of the disc with sapphire substrate and quartz compensating plate for different formats of optical data storage.

Table 3. **The thickness of sapphire and quartz layers for various formats optical discs**

| Type of media | The thickness of sapphire substrate (mm) | The thickness of quartz plate (mm) | Uncompensated aberration $\Delta\Phi/\Phi_0$, 100% |
|--|--|------------------------------------|---|
| CD | 0,714 | 0,486 | 1 |
| DVD | 0,357 | 0,243 | 1,6 |
| CD (for reading at a wavelength of $\lambda = 400$ nm) | 0,714 | 0,486 | 0,3 |

In the case of using standard optical information reading system the total thickness of quartz compensating plate and the sapphire substrate to be approximately equals (condition 2) the thickness of the polycarbonate substrate (due to the broad maximum of spherical aberration at $n_2 = 1,7$ and a symmetrical arrangement with respect to the maxima of the refractive index of quartz, sapphire, and polycarbonate - eq. 7). This condition is not rigorous, but it is sufficiently precise for the engineering calculations of the optical system. In principle, the equation (3) can be use to obtain more stringent condition for spherical aberration compensation. Note that in the case BD-format compensating quartz plate is very thin, which can lead to reduced in reliability of data storage on such media and causes difficulties during its manufacture.

Fig. 5 shows a schematic diagram of optical information reading system from optical media [11]. During data reproducing laser light is generated by a laser diode (1) through the diffraction grating (2), a quarter-wave plate (4) and the beam splitter cube (3) is directed to a focusing objective lens (5). The focusing lens focuses the laser beam through compensating plate (6) and media substrate (7) to the relief structure of information media. Presence of single crystal compensating plate leads to the fact that ordinary and extraordinary beams are focused by focusing depth in one plane.

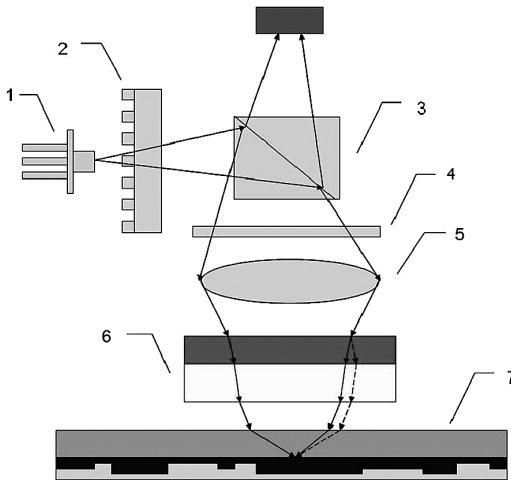


Fig. 5. Information reading system from optical media

3. EXPERIMENTAL RESULTS

Fig. 6 shows the results of the experimental verification of the method. The pits of CD format were recorded on chrome disc and photo was taken through the sapphire plate with thickness of 1 mm. The images were performing by a microscope having a 3 mm cover glass and numerical aperture $NA = 0,5$. In the first case (Fig. 6 (a)) the image was taken through a 3 mm glass plate. In the second case (Fig. 6 (b)) sapphire plate was supplemented without a compensation of astigmatism and therefore we used a cover glass of thickness 2 mm to have a total thickness of all plates of 3 mm. In the third case (Fig. 6 (c)) an additional quartz plate with a thickness of 0.7 mm was placed for compensation of astigmatism of sapphire substrate and therefore the cover glass of thickness 1.3 mm was used to have a total thickness of all plates of 3 mm.

From Fig. 6 one can see that the image quality through the glass plate and sapphire plate with compensation is almost the same. However in the case of image taking through a sapphire plate without compensation we received a blurred picture with significant distortions.

4. CONCLUSIONS

1. The influence of axial birefringence on the propagation of focused laser beam through uniaxial birefringent media with vertical optical axis is investigated. The expression for calculating the geometrical aberrations of focused laser beam in single crystal substrate of optical disk is obtained.

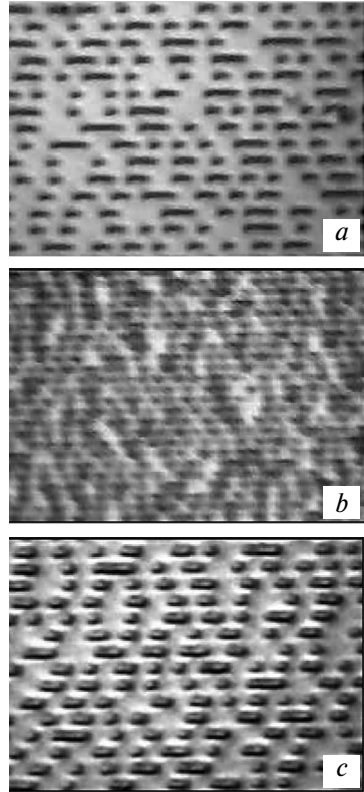


Fig. 6. Images of CD structure through: *a* – 3 mm glass plate, *b* – sapphire substrate without using the quartz compensating plate and *c* – sapphire substrate using the quartz compensating plate

2. The permissible level of anisotropy for different optical disc format, the permissible value of thickness for different disc formats and the maximum thickness of the sapphire optical disc in which there will be no significant distortion of the signal are calculated.

3. The method of aberration compensation for reading of information from uniaxial birefringent media with vertical optical axis was developed. The basic parameters of reading system from sapphire disc with vertical optical axis are calculated. Constructional parameters (thickness) of the disc with sapphire substrate and quartz compensating plate for different formats optical disks are represented.

4. Experimental verification of the compensation method was performed. It is shown that the image quality through glass plate and sapphire plate with compensation is about the same. The experimental results showed that the use of additional compensating quartz plate allows us performing the information reading from optical sapphire disks.

REFERENCE LIST

1. D. E. Nikles, C. E. Forbes, Accelerated aging studies for polycarbonate optical disk substrates. Proc. SPIE 1499, Optical Data Storage (1991).
2. E. Toppin, Setting a new standart in permanent archival storage, Digital 2Disc, P. 42-44 (2010).
3. Ukrainian Patent #73611, G11B 7/254 (2011).
4. J. Vries, D. Schellenberg, L. Abelmann et al., Towards Gigayear Storage Using a Silicon-Nitride/Tungsten Based Medium, ArXiv.org: 1310.2961v1 (2013).
5. Access point: <http://news.sciencemag.org/sciencenow/2012/07/a-million-year-hard-disk.html> [Electronic Resource].
6. J. Zhang, M. Beresna, P. Kazansky, 5D Data Storage by Ultrafast Laser Nanostructuring in Glass (2013).
7. V.V. Petrov, A.A. Kryuchyn, I.V. Gorbov et.al., Nanosistemy, nanomaterialy, nanotehnologii, 7, 825 (2009) [in Russian].
8. An original source: E.R. Dobrovinskaya et al., Sapphire: Material, Manufacturing, Applications, Springer Science + Business Media, Philadelphia (2009).
9. M. Mansuripur, Distribution of light at and near the focus of high-numerical-aperture objectives, J. Opt. Soc. Am. A 3, 2086 (1986).
10. S. Stallinga, Axial birefringence in high-numerical-aperture optical systems and the light distribution close to focus, J. Opt. Soc. Am. A, 18, 2846 (2001).
11. Patent Application #a201301017 (2013) [in Ukrainian].

V. V. Petrov, V. P. Semynozhenko, V. M. Puzikov, A. A. Kryuchyn,
A. S. Lapchuk, S. M. Shanoilo, I. V. Kosyak, Yu. O. Borodin,
I. V. Gorbov, Ye. M. Morozov

READOUT OPTICAL SYSTEM OF SAPPHIRE DISKS INTENDED FOR LONG-TERM DATA STORAGE

Arxiv.org – 2014. Article ID arXiv:1403.3119. 10 p.

Abstract. The development of long-term data storage technology is one of the urging problems of our time. This paper presents the results of implementation of technical solution for long-term data storage technology proposed a few years ago on the basis of single crystal sapphire. It is shown that the problem of reading data through a substrate of negative single crystal sapphire can be solved by using for reading a special optical system with a plate of positive single crystal quartz. The experimental results confirm the efficiency of the proposed method of compensation.

Keywords: sapphire optical disk, long-term data storage, quartz, birefringence, aberrations compensation.

1. INTRODUCTION

One of the major problems facing mankind is the preserving and transmitting obtained knowledge to the succeeding generations. Its solution is not possible without creating a media that would provide long-term data storage. A long shelf life of data storage is generally understood as the data retention that greatly exceeding the shelf life of information recording on the best acid-free paper having the shelf life of about 200 years. However, the real time of data storage in modern storage devices ranges from 3 to 30 years.

The optical discs have a great potential for long-term archival storage. However, the modern optical discs can not provide the required level of reliability and data retention time due to the low stability of the

polycarbonate substrate [1], and not sufficiently high its adhesion to the metal layer. The variety of technical solutions is proposed for technology of long-term storage which is based on using highly stable materials for both substrate and recording mediums.

First designed and manufactured optical discs had a substrate of silica glass [2]. Their data retention time could not exceed of 20-30 years because of time degradation of recording layer based on chalcogenide glasses [3].

The cermets are used as recording medium in long-term optical M-discs of write-once format with shelf life of 150-160 years [4]. A borosilicate glass is proposed as medium of the disc substrate as well as refractory metals such as tungsten and platinum are proposed to use for recording layer. An embossed microstructure on the surface is prepared by ion etching [5]. It is proposed to seal tungsten alloy disc by silicon nitride [6] and to read the information from platinum layer through sapphire windows [7]. The quartz is also proposed as substrate of optical disc for long-term data storage [8]. The establishment of such data storage focuses on long-term and reliable data storage, rather than getting the limit values of density and large amounts of data storage [5, 6, 8, 9].

2. FOUNDATION FOR THE CHOICE OF OPTICAL DISC SUBSTRATE MEDIUM AND THE PECULIARITIES OF OPTICAL SCHEME OF RECORDING SYSTEM

Materials for the manufacture of optical discs having long-term data storage must be chemically, thermally and mechanically stable. The main elements determining parameters of the optical disc are a transparent layer (substrate) through which the information is reading and recording layer on which information is recorded. Disc substrate layer is an external unprotected and it defines the types of materials and technologies that can be applied in the deposition of the recording layer, so the choice of the substrate medium is the key element in development of technology of long-term data storage.

One of the main causes of data loss is the appearance on the substrate surface roughness and scratches. Therefore, the optical disc substrate must be formed from the hard as possible material. The reliability to multiple data retrieving requires that the substrate medium was resistant to light and ultraviolet radiation. For the stability of the optical disk to large temperature

changes and the possibility of using refractory alloys as recording layers, the substrate material should be a refractory one. Another important factor of the reliability is high thermal conductivity of the substrate as small thermal conductivity can cause localized heating and as a result, to permanent deformation of the disc. Furthermore, when using a refractory metal as a material of the recording layer, the linear coefficient of thermal expansion of disc substrate must not significantly differ from values for the metals.

The similar requirements for physical and technical characteristics are imposed on optical materials that are used for optical sensors and observation windows in the chemical, nuclear and space industries. Therefore, as a substrate for non-volatile storage can be used the materials that are applied for the optical sensing and observation windows in these industries. It should be noted that there is one significant limitation on the optical characteristics of the substrate material, namely, the optical anisotropy of the optical disc substrate should not go beyond the uniaxial birefringence because otherwise the compensation of aberrations being caused by the anisotropy of the substrate is a problematic task. Table 1 summarizes both the optical and physical characteristics of the materials that can be used for optical disc data retention.

Table 1. Physical and chemical properties of materials suitable for the manufacture

| Parameters \ Material | Sapphire (Al ₂ O ₃) | Quartz (SiO ₂) | Fused quartz (SiO ₂) | Yttrium aluminum garnet (Y ₃ Al ₅ O ₁₂) | Magnesium aluminate (MgAl ₂ O ₄) | Diamond (C) |
|--|---|-------------------------------|-------------------------------------|--|--|---------------------|
| State of matter | Crystalline | Crystalline | Amorphous | Crystalline | Crystalline | Crystalline |
| Optical type of crystal | Negative | Positive | – | – | – | – |
| Mohs hardness | 9 | 7 | 5,3 – 6,5 | 8,5 | 8 | 10 |
| Fusing temperature (K) | 2300 | 1960 | 1350 (softening) | 2210 | 2400 | 1100 (burn down) |
| Thermal conductivity coefficient <i>k</i> (W/(mK)) | ~34 | 3 | 1,3 | 14 | 15 | 3200 |
| Coefficient of linear thermal expansion $\alpha \cdot 10^{-6}$ (1/K) | 5,6 | 0,55 | 0,55 | 8,0 | 7,5 | 1,0 |
| Chemoresistance | 1* | 2* | 3* | 1* | 3* | 1* |
| Resistance to UV radiation | Not degraded | Not degraded | Degraded | Not degraded | Not degraded | Not degraded |

1* – soluble in concentrated solutions of fluoride salts (such as, BaF₂, MgF₂, PbF₂, and oxides) at very high temperatures (> 1000 °C);

2* – soluble in alkaline aqueous solutions at high temperatures (> 300 °C) and solution of hydrofluoric acid;

3* – soluble in aqueous alkaline solutions and solution of hydrofluoric acid.

From the data in Table 1 is clear that sapphire, quartz, yttrium aluminum garnet and magnesium aluminates have physical characteristics required for long-term data storage and therefore can be used as medium fore substrates of the long-term optical disc.

Sapphire is the hardest material being made of cheap components, and its technology for growing single crystals is simple and affordable process. The disadvantage of sapphire is its sufficient optical anisotropy (birefringence) and as a consequence, the complexity of the optical scheme for reading information in the sense of the aberrations compensation caused by the anisotropy.

Yttrium aluminum garnet and magnesium aluminate have got a cubic lattice, and, consequently, they are optically isotropic materials (not exhibit birefringence). Therefore, reading out through the substrate made of these materials does not require any additional methods of the aberrations compensations caused by the substrate anisotropy. Their disadvantages are smaller than sapphire hardness and the production of optical discs with a diameter of either 80 mm or 120 mm is a very labor-intensive and costly.

Diamond has several unique physical characteristics. However, there is no technology of single-crystal diamond with dimensions required for optical recording and the actual production of mono crystalline diamond is extremely expensive. Furthermore, in ambient atmosphere at a temperature of 1100 °C and more the diamond burns.

Single crystalline quartz is considerably inferior to sapphire in hardness and is a uniaxial crystal. Fused silica has no optical anisotropy, but it has a considerably lower compared with the other materials listed in Table 1, hardness and is sensitive to ultraviolet (darkens).

From the above analysis of physical and technical properties of the materials, it is clear that sapphire is one of the best materials for the manufacture of substrates of optical disc for long-term storage of information. In favor of the sapphire is the fact that among of the crystals, the production of which is mastered in significant quantities and already having a comparatively low cost of manufacturing, the leader is the sapphire (Al_2O_3). The analysis of existing highly stable uniaxial single crystal materials has demonstrated that the best material for the optical disc substrate is leucosapphire [9, 10], on the internal surface of which the information micro relief structure is formed [5, 9, 10] since it has a high chemical stability, its wear resistance is 8 times greater than that of steel, it is thermally stable up to 1600 °C and it is optically transparent in the range from 0.17 microns to 5.5 microns [11].

The sapphire birefringence is cause of aberrational distortions of the scanning laser beam as it passes through the optical disc. This is posed by the difference in optical path of light rays with different polarization that makes impossible to use the standard optical system for reproducing the information from the optical disc with a birefringent substrate. The orientation of the sapphire single crystal axis 0001 parallel to the optical axis of the optical head will results in a constant magnitude of aberrations during rotation of the optical disc. However the magnitude of aberrations is so large that the resolution of the optical system drops 4.3 times for the case of numerical aperture of 0.4 and it becomes more significant with an increase of numerical aperture. Accordingly, the use of the birefringent single crystal materials as substrates for optical discs requires a change of standard optical reading out system so as to compensate the aberrations created by rays with different polarization. This minimization of the polarization effect can only be applied to those optical discs manufactured from uniaxial birefringent materials with the optical axis orthogonal to the disc surface.

The sapphire substrate on which information is recorded in the form of a micro relief structure, and the data are read through the sapphire substrate can be a key element of technology for optical data storage with high reliability and long shelf life [9, 10]. Thickness of the substrate may be 0.4-1.2 mm, which provides sufficient mechanical strength to the carrier. Sapphire substrates have significant birefringence ($n_o = 1.78038$ and $n_e = 1.77206$, $\lambda = 442$ nm), which leads to significant aberrations when focusing the laser emission through the substrate of the carrier.

A superposition of astigmatism and spherical aberrations of different orders arise from different optical path (spherical front phase distortions) of s- and p-polarized peripheral rays of focused laser beam propagating through sapphire substrate. In particular, spherical front phase distortions lead to the fact that radiation with orthogonal polarizations is focused in different places, the distance between which ΔF is defined as follows:

$$\Delta F = 2h\Delta n/n_o, \quad (1)$$

where Δn is the difference between the refractive indices of the ordinary (n_o) and extraordinary (n_e) beam (for sapphire $\Delta n = 8 \cdot 10^{-3}$), h – thickness of the substrate.

When focusing through the sapphire substrate with thickness of 1 mm, the distance between the spots is several times larger than the depth of focus.

This makes it impossible to reliably reproduce the recorded data. There is a possibility to compensate the aberrations caused by the anisotropy of the sapphire substrate using an additional compensating plate with a positive uniaxial material (inverse to the sapphire). The study of available transparent uniaxial optical crystals showed that the best material for compensating aberrations of the sapphire substrate is quartz that has $n_o = 1.5443$, $n_e = 1.5534$. Conditions for obtaining the optical system with minimal residual aberrations can be written as:

$$H_{kvr} / H_{spf} = 0,68; H_{kvr} + H_{spf} = H, \quad (2)$$

where H_{kvr} and H_{spf} are the quartz plate and the sapphire substrate thicknesses, respectively. First condition follows from astigmatism aberration compensation and second – from spherical aberration compensation. Table 2 shows the thickness of the sapphire substrate and compensation quartz plate for optical discs in various formats.

Table 2. Thickness of the sapphire substrate and the quartz plate compensation for optical discs of different formats

| Type of media | The thickness of sapphire substrate (mm) | The thickness of quartz plate (mm) | Uncompensated aberration $\Delta\Phi/\Phi_0$, 100% |
|--|--|------------------------------------|---|
| CD | 0,714 | 0,486 | 1 |
| DVD | 0,357 | 0,243 | 1,6 |
| CD (for reading at a wavelength of $\lambda = 400$ nm) | 0,714 | 0,486 | 0,3 |

Hence it is possible to carry out reproduction of data by reading through a sapphire substrate by using special focusing optical system comprising a quartz plate. Such carriers can be used for long-term data storage due to the high thermodynamic stability of sapphire. Schematic representation of the method of compensation of aberrations is shown in Fig. 1.

The study of existing transparent uniaxial optical crystals demonstrated that the best material for compensation of aberrations in the sapphire substrate is quartz, which has the following refractive indices: $n_o = 1.5443$, $n_e = 1.5534$.

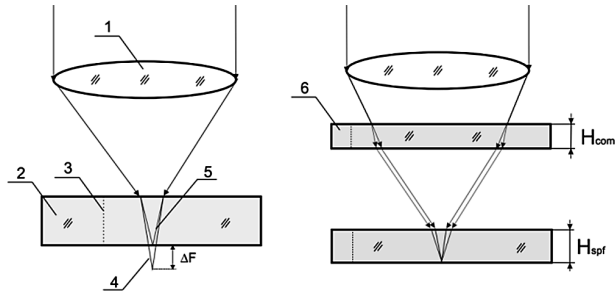


Fig. 1. Schematic representation of the propagation of the ordinary and extraordinary rays: 1 – lens, 2 – sapphire substrate, 3 – optical axis, 4 – extraordinary ray, 5 – ordinary ray, 6 – quartz plate

3. EXPERIMENTAL RESULTS

The information (in a standard CD-ROM format) was recorded (at 2X speed) on photoresist layer with thickness of 150 nm deposit on sapphire disc having a thickness of 0.7 mm and a diameter of 80 mm by audio recording laser station established at the Institute for Information Recording of NAS of Ukraine. A single-mode semiconductor laser QLD-405-100S (405 nm, 100 mW) was used as a source of coherent light. Power of the laser beam at the output of the lens was 3 mW. Etching time of the photoresist layer in an alkaline etchant consisted 7 seconds. A modified optical ROM drive Plextor PX-891 SA was used for the optical system test.

Fig. 2 shows the optical scheme for data readout from sapphire optical disc [11]. During data reproduction, the laser beam from a laser diode (1) passed through the

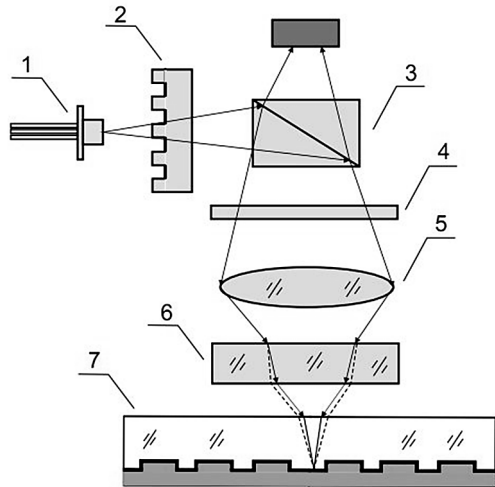


Fig. 2. The optical system for reading data from sapphire disk

diffraction grating (2), a quarter-wave plate (4), and the beam splitter cube (3) and is directed onto the focusing objective lens (5). The focusing lens focuses the laser beam through a compensating plate (6) and a substrate carrier (7) on the microstructure relief of information carrier. The standard reading device modification is consisted in fixing a compensating quartz plate (with vertical orientation of optical axis) having a size 5x5x0.5 mm to the lens by gluing method.

The presence of a compensating plate made of uniaxial single crystal material leads to the compensation of optical path difference between s- and p- polarized rays and focusing them in one focal plane. The results of test pointed out that the quartz compensating plate allows a robust data retrieving in the case of reading data through sapphire substrate by a standard optical drive. Figure 3 demonstrates the result of test obtaining by Nero CD-DVD

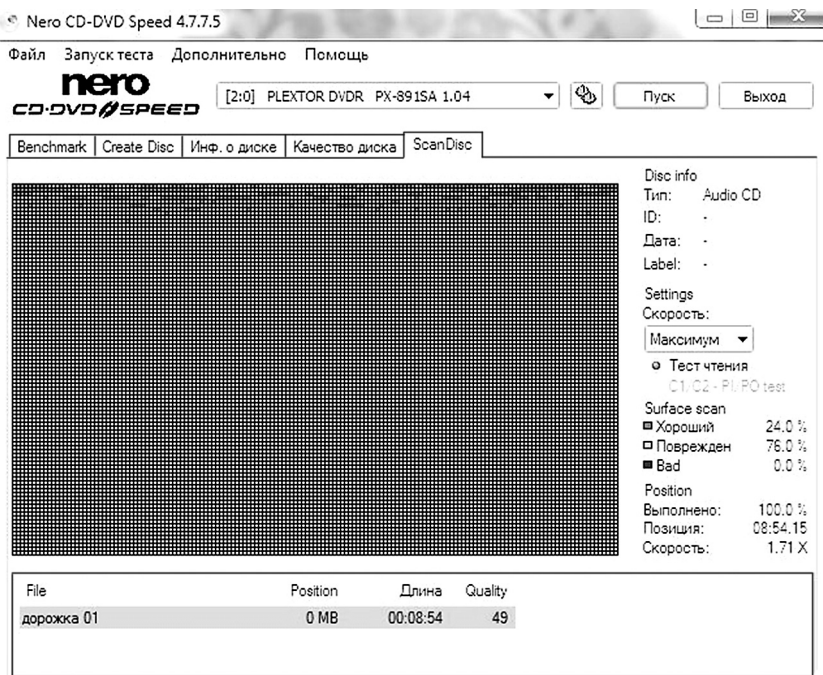


Fig. 3. The results of the test of retrieving data through sapphire substrate reading out by modified standard reading device. The results obtained by Nero CD-DVD Speed program

Speed program, from which one can see that the disc does not have uncorrectable errors C2, but there are small numbers of correctable errors C1.

The experiment has pointed out the possibility of full compensation of polarization stipulated wave front distortion of the sapphire substrate. The individual method of sapphire substrates manufacture allows obtain more accurate substrate thickness than in injection molding process of polycarbonate optical discs. The transparency of sapphire in the ultraviolet range allows using shorter wave radiation for recording and reproducing information.

Almost all possible types of optical discs can implement on the basis of sapphire substrates:

- optical disc with thermally treated and metalized photoresist layer;
- CD-ROM with a high-reflective coating;
- the magneto-optical and CD-RW;
- CD-R disk.

CD-ROM with a high-reflective coating is the primary format for the implementation of optical discs with a shelf life of optical discs within the tens of thousands of years or even more. The main limiting factor for the shelf life can be adhesion of reflective coating. The most long-term data storage can be hopefully got on the hermetic CD-ROM drives without a reflective coating. Realization of the magneto-optical and CD-RW optical drive on a sapphire substrate will allow get more high-optical materials and hence significantly increase a shelf life of data storage. Application of the CD-R technology can also lead to the increase of shelf life of optical disk due to the high chemical resistance of sapphire and the high melting point.

4. CONCLUSIONS

1. It has been considered the effect of birefringence on the distribution of the focused laser beam through a uniaxial birefringent medium having a vertical orientation of the optical axis. An expression for the calculation of the geometric aberrations of the focused laser beam in single-crystal substrate of the optical disc has been presented.

2. The permissible levels of the anisotropy were calculated for optical discs of different formats allowable thickness discs of different formats and the maximum thickness of sapphire optical discs in which there is no significant signal distortion have been demonstrated.

3. The method of compensating aberrations when reading data from uniaxial birefringent medium was developed. The basic parameters of reading out system for the sapphire disc with a vertical optical axis orientation were calculated. The structural parameters (thickness) of the optical disc sapphire substrate and quartz compensating plate of different formats were presented.

4. An experimental verification of the method of the aberrations compensations which showed that the quality of images obtained through the glass and sapphire plate with compensation, virtually identical has been performed. Thus, the application of the compensating quartz plate further allows read information from the optical sapphire disc for information retention.

REFERENCES

1. D. E. Nikles, J. M. Wiest, Accelerated aging studies and the prediction of the archival lifetime of optical disc media. Proc. SPIE 3806, Recent Advances in Metrology, Characterization, and Standards for Optical Digital Data Disks (1999).
2. V.V. Petrov, N.V. Gorshkov, "Optical disk as a unique information media for controlling systems", Worldwide Electro technique Forum, materials, Sect. 7, Rep. 44, pp. 1-21 (1977).
3. V.V. Petrov, A.A. Kryuchin, I.V. Gorbov, I.O. Kossko, S.O. Kostyukevych, "Analysis of properties of optical carriers after long-term storage", Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics, Vol. 12, #4, pp. 399-402 (2009).
4. Access point: <http://www.ritek.com/m-disc/eng/download/001.pdf> [Electronic Resource].
5. Ukrainian Patent #73611, G11B 7/254 (2011).
6. J. Vries, D. Schellenberg, L. Abelmann et al., Towards Gigayear Storage Using a Silicon-Nitride/Tungsten Based Medium, ArXiv.org: 1310.2961v1 (2013).
7. Access point: <http://news.sciencemag.org/sciencenow/2012/07/a-million-year-hard-disk.html> [Electronic Resource].
8. J. Zhang, M. Beresna, P. Kazansky, 5D Data Storage by Ultrafast Laser Nanostructuring in Glass (2013).
9. Ukrainian Patent #73611, G11B 7/254 (2005).
10. V.V. Petrov, A.A. Kryuchyn, I.V. Gorbov et.al., Nanosistemy, nanomaterialy, nanotehnologii, 7, 825 (2009) [in Russian].
11. An original source: E.R. Dobrovinskaya et al., Sapphire: Material, Manufacturing, Applications, Springer Science + Business Media, Philadelphia (2009).
12. M. Mansuripur, Distribution of light at and near the focus of high-numerical-aperture objectives, J. Opt. Soc. Am. A 3, 2086 (1986).
13. S. Stallinga, Axial birefringence in high-numerical-aperture optical systems and the light distribution close to focus, J. Opt. Soc. Am. A, 18, 2846 (2001).
14. Patent Application #a201301017 (2013) [in Ukrainian].

**V. V. Petrov, A. A. Kryuchyn, A. S. Lapchuk, I. V. Gorbov,
D. Yu. Manko, Minglei Fu, S. M. Shanoylo and Ye. M. Morozov**

LONG-TERM DATA PRESERVATION ON SAPPHIRE OPTICAL DISCS

SPIE Proc. 2016. V. 9818. Article ID 981802. 4 p.

Abstract. The improved scheme of data recording process on an optical disc based on a substrate made of high-stable materials has been proposed. Information layer with depth of 115 nm and width of 600 nm has been obtained on sapphire substrate by ion-beam etching using improved scheme. These experimental results allow to create the sapphire optical discs for longterm data storage.

Keywords: sapphire, optical disc, long-term data storage, microrelief, ion-beam etching.

1. INTRODUCTION

Long-term data preservation is one of the major challenges that humankind is currently facing. The most important information that needs to be stored reliably for a long time is medical information, genome databases, documents of national importance, cultural heritage, scientific knowledge, important technical facilities, and etc [1]. Optical data storage has a lot of significant advantages over other kinds of storage systems [2, 3]. Above all, optical discs are resistant to influence of electromagnetic fields and high humidity. Additionally, contactless readout promises undamaged multiple information playbacks. There are three key points in technology of development of optical discs for long-term data storage [4, 5]: 1) information must be stored in the form of a microrelief on the optically transparent substrate (i.e. ROMtype media); 2) substrate and reflective metallic layer

must be resistant to malice influence (high temperature and humidity, mechanical and chemical impacts, etc.); so, they should guarantee the preservation of data even in extreme conditions of storage (such as fire, flood, and etc); 3) reflective metallic layer must have a high adhesion to the substrate material.

For today, optical discs with polycarbonate substrates are most commonly used. But polycarbonate is characterized by low optical, mechanical and chemical stability for long-term data storage [6]. Besides, polycarbonate has a low adhesion to reflective metallic layer commonly used in CD/DVD/BD discs manufacture. In order to increase shelf life of optical media a number of technical solutions have been proposed, namely: optical M-disc with averaged shelf life of about 1000 years [7], storage using nanostructured glass with seemingly unlimited lifetime [8], and analog sapphire disc «Nanoform» [9].

Another approach is to store the information in digital form on the optical disc with substrate made of high-stable singlecrystal sapphire [4,10]. The advantages of sapphire is that it can survive high temperature (2318 K), has high chemical stability, its wear resistance is 8 times greater than that of steel, it is optically transparent in the range from 0.17 to 5.5 μm [11]. Comparison of estimated shelf life for different substrate materials is shown in Table [4].

Table. Comparison of estimated shelf life for different substrate materials

| Substrate material | Melting temperature, K | Data storage terms relative to those of the polycarbonate CD | Storage term, years |
|--------------------|------------------------|--|---------------------|
| Polycarbonate | 523 | 1 | ~20 |
| Sodium glass | 923 | $e^{1.36} = 3.91$ | ~80 |
| Glassceramic | 1696 | $e^{4.00} = 54.78$ | ~1100 |
| Silica glass | 1986 | $e^{4.99} = 146.94$ | ~2900 |
| Sapphire | 2318 | $e^{6.13} = 457.73$ | ~9000 |

In addition, sapphire is one of the hardest materials being made of cheap components, and technology for growing single crystals sapphire is simple and affordable process. The sapphire optical disc on which information is recorded in the form of a microrelief, and the data are read out through the sapphire substrate can be a corner stone of technology for optical data

storage with high reliability and long shelf life. Thickness of the media may be in the range of 0.4-1.2 mm, which provides sufficient mechanical strength enough. The disadvantage of sapphire is optical anisotropy (birefringence). The sapphire birefringence causes the wavefront distortions of the readout laser beam as it passes through the optical disc. In paper [12] a method of aberration compensation in sapphire optical disc has been proposed and developed. The results of experiments in which information has been recorded in a photoresist layer on the sapphire substrate, confirmed the efficiency of the compensation method [13,14]. The next step is to produce the standard optical disc based on high-stable materials, namely leucosapphire.

2. MICRORELIEF CREATION ON THE SURFACE OF SAPPHIRE SUBSTRATE

Chemical and mechanical durability of the sapphire creates some difficulties of microrelief creation on the surface of sapphire substrate. Creation of the relief directly by a focused laser beam is practically impossible. Ion-beam (and reactive ion-beam) etching is one of the most suitable methods for microrelief creation on the surface of high-stable materials [15]. The relief depth is calculated in compliance with ISO/IEC 10149:1995 defining data interchange on readonly 120 mm optical data discs [16]. The relief depth for soda-siliceous glass (refractive index is 1.51) is about 120 nm, for fused silica (refractive index is 1.46) – 130 nm, and sapphire (refractive index is 1.77) – 110 nm. The conventional scheme of data recording process consists of following steps [4]. The positive photoresist layer is deposited on the substrate surface. The ratio of photoresist and substrate materials etching rate defines the thickness of photoresist layer. There must be a 150 nm photoresist layer thickness for performing information later with 110-130 nm depth. The information is recorded on photoresist layer via laser recording system by focused laser beam. Parameters of laser recording system define the format of optical disc for long-term data storage. The etching mask is performed by selective etching of recorded photoresist layer. The information relief on the substrate surface is performed by reactive ion beam etching. It was shown that maximum depth of microrelief on sapphire substrate is equal to 95 nm [4] and limited by initiation of surface charge induced by positive ions

bombardment in the case direct (zero frequency) ion-beam etching. Experimental results have shown that in this case the speed of etching equals 3nm per minute for sapphire and 10 nm per minute for photoresist. In order to increase microrelief depth the using of additional metallic masks has been proposed [17]. In further investigations it was suggested to use an additional layer of chromium, since it has a high adhesion to substrate[18] (Fig. 1)

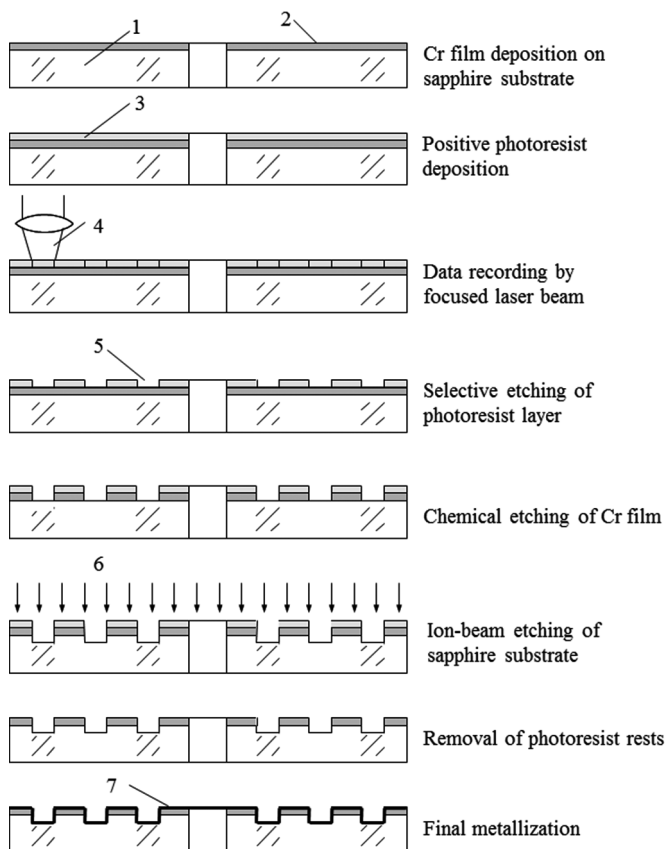
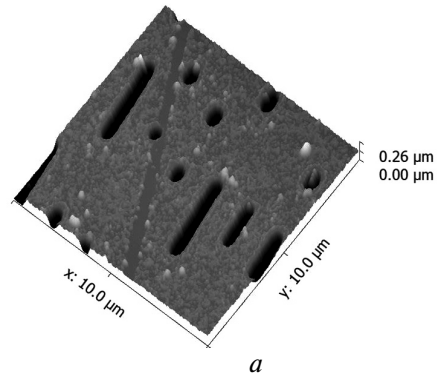


Fig. 1. Improved scheme of data recording process on the optical disc for long-term data storage: 1 – sapphire substrate, 2 – Cr film, 3 – positive photoresist layer, 4 – focused laser beam, 5 – etching mask, 6 – ion beam, 7 – reflective metallic layer

Chromium film was deposited by thermal evaporation. Thickness of Cr film was equal to 50 nm. The positive photoresist layer is deposited on the Cr film by centrifugation and subsequent annealing in air atmosphere with $T = 363.15$ K for 1 hour. Thickness of photoresist layer was 150 nm. Chemical etching of Cr film was performed by 20 % CeSO_4 solution for 2 minutes. Further, the ion-beam etching of sapphire substrate was performed through windows in Cr and photoresist layers. AFM image of sapphire substrate after ion-beam etching is shown in Fig. 2.



In Fig. 3 the dependence of pit depth on etching time is shown.

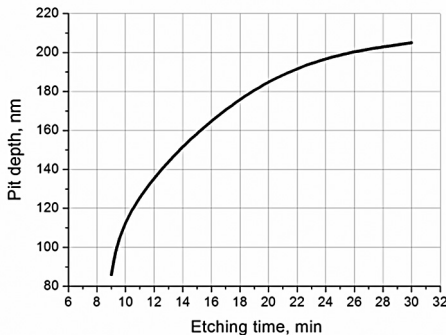
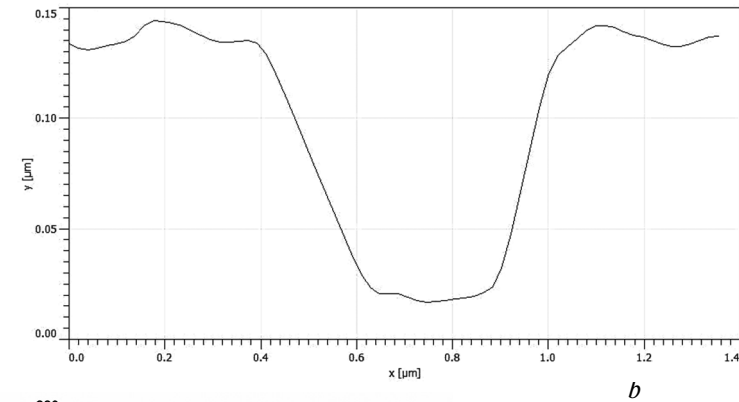


Fig. 2. AFM image of sapphire substrate after ion-beam etching with additional Cr film (a) and depth profile across pit (b).

Fig. 3. Dependence of pit depth on etching time.

From Fig. 2 one can see that depth and width of pits are about 115 nm and 600 nm, respectively, which is sufficient for the production of sapphire discs for long-term data storage at modern optical information formats.

3. CONCLUSION

The key point of long-term data preservation on optical discs is to use the high-stable materials. One of these ones is a single-crystal sapphire. Estimated shelf life of proposed optical sapphire disc exceeds 9000 years under normal conditions. In this work, we propose an improved scheme of data recording process on sapphire optical disc for long-term data storage. Microrelief with depth of 115 nm on sapphire substrate by ion-beam etching with improved scheme has been obtained. These experimental results allow us to create the sapphire optical discs for long-term data storage.

Acknowledgment. The results of investigations presented in this article were obtained due to the support of the High-end Foreign Expert Program of China No. GDT20153300054.

REFERENCES

1. Watanabe, A., «Optical library system with extended error-correction coding for long-term preservation» IEEE Massive Storage Conference, Long Beach, CA, USA (2013). <http://storageconference.us/2013/Presentations/Watanabi.pdf>
2. Wan, S., Cao, Q., Grande M., Xie C., «Optical storage: an emerging option in long-term data preservation» Front. Optoelectron. 7(4), 486-492 (2014).
3. Lunt, B., «How long is long-term data storage» Archiving Conference, Salt Lake City, Utah, USA, 29-33 (2011).
4. Petrov, V., Kryuchyn, A., Gorbov, I., «High-density optical disks for long-term information storage» Proc. SPIE 8011, doc. ID 80112J (2011).
5. Gorbov, I., «Basic features of optical media for long-term data storage,» Pomiary, Automatyka, Komputery w Gospodarce i Ochronie Srodowiska 4, 35-37 (2010).
6. Nikles, D. E., Forbes, C. E., «Accelerated aging studies for polycarbonate optical disk substrate» Proc. SPIE 1499, 3p. (1991).
7. Summary report by ISO/IEC 10995 test program performed by Millenniata on M-DISCTM DVD [electronic resource]. <http://www.ritek.com/m-disc/eng/download/001-n.pdf>

8. Zhang, J., Cerkauskaite, A., Drevinskas, R., Patel, A., Beresna, M., Kazansky, P., «Eternal 5D data storage by ultrafast laser writing in glass» Proc. SPIE 9736, 97360U (2016).
9. Fahrenheit 2451 – Preserve your data in a sapphire disk: preserve your most precious memories for thousands of years [electronic resource]. <http://www.fahrenheit2451.com/>
10. Petrov, V. V., Puzikov, V. M., Kryuchin, A. A. and Gorbov, I. V., «Optical disks for long-term information storage» *Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies* 7(3), 825-832 (2009) [in Russian].
11. Dobrovinskaya, E. R., Lytvynov, L. A., Pishchik V., [Sapphire: Material, Manufacturing, Applications], Springer Science + Business Media, Philadelphia (2009).
12. Petrov, V. V., Semynozhenko, V. P., Puzikov, V. M., Kryuchyn, A. A., Lapchuk, A. S., Morozov, Ye. M., Borodin, Y. O., Shyhovets, O. V., Shanoilo, S. M., “Method of aberration compensation in sapphire optical disks for long term data storage” *Functional Materials* 21(1), 105-111 (2014).
13. Kryuchyn, A. A., Petrov, V. V., Shanoilo, S. M., Lapchuk, A. S. and Morozov, Ye. M., «Sapphire optical discs for long term data storage» Proc. SPIE 9201, 92010C (2014).
14. Petrov, V. V., Semynozhenko, V. P., Puzikov, V. M., Kryuchyn, A. A., Lapchuk, A. S., Shanoilo, S. M., Kosyak, I. V., Borodin, Yu. O., Gorbov, I. V. and Morozov, Ye. M., «Readout optical system of sapphire disks intended for long-term data storage» arXiv.org, arXiv:1403.3119v2 [cs.ET], 10 p. (2014).
15. Gorbov, I. V., Petrov, V. V. and Kryuchyn, A. A., «Using ion beams for creation of nanostructures on the surface of high-stable materials» *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics* 10(1), 27-29 (2007).
16. Gorbov, I. V., «The influence of substrate’s material refractive index on optical media data layer relief depth», *Data recording, storage and processing* 11(1), 3-10 (2009).
17. Jeong, C. H., Kim, D. W., Bae, J. W., Sung, Y. J., Kwak, J. S., Park, Y. J. and Yeom, G. Y., «Dry etching of sapphire substrate for device separation in chlorine-based inductively coupled plasmas» *Materials Science and Engineering B* 93, 60-63 (2002).
18. Gorbov, I. V., Manko, D. Yu., Kryuchyn, A. A., Le, Z., Fu, M. and Pankratova, A. V., «Optical disc for longterm data storage based on chromium film» *Metallofiz. Noveishie Technol.* 38(2), 267-275 (2016).

В. В. Петров, А. А. Крючин, С. М. Шанойло

ОПТИЧЕСКИЕ НОСИТЕЛИ ДОЛГОВРЕМЕННОГО ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Электронное моделирование. 2016. Т. 38. № 4. С. 99-108

Представлен анализ методов создания оптических носителей долговременного хранения информации. Показано, что решить задачи долговременного хранения стратегически важной информации можно при использовании сапфировых дисков с микрорельефным представлением данных. Представлены данные о записи субмикронных структур на поверхности сапфировых подложек и воспроизведении записанных данных сфокусированным лазерным излучением.

Представлений анализ методів створення оптичних носіїв довготривалого зберігання інформації. Показано, що вирішити завдання довготривалого зберігання стратегічно важливої інформації можна при використанні сапфірових дисків з микрорельефним представленням даних. Представлені дані про записи субмікронних структур на поверхні сапфірових підкладок і відтворення записаних даних сфокусованим лазерним випромінюванням.

Ключевые слова: оптические носители, долговременное хранение информации, сапфировые диски

Необходимость создания и использования оптических запоминающих устройств определялась двумя основными особенностями метода оптической записи: высокими плотностью записи и надежностью хранения информации. С использованием оптических дисков емкостью (1–50) Гбайт были созданы архивы хранения электронных документов, организованы массовое распространение мультимедийной информации и компьютерное книгопечатание. Существенные достижения в технологии магнитной записи и твердотельной памяти позволили

создать системы памяти, которые обеспечивают хранение гигантских массивов данных. Развитие методов записи информации позволило создать ближнеполевые методы регистрации данных на жестких магнитных дисках с плотностями записи, которые не достижимы в традиционных оптических запоминающих устройствах с дифракционно ограниченными системами фокусировки излучения. Это привело к тому, что существенно уменьшилась роль компакт-дисков. Однако проблема длительного хранения данных не решена и создание носителей долгосрочного хранения данных связывают с оптическими носителями информации. Они имеют значительные потенциальные возможности для организации долгосрочного хранения информации наиболее полно удовлетворяют требованиям к носителям информации долгосрочного хранения данных [1, 2]. Оптические носители имеют ряд особенностей, которые позволяют использовать их для длительного хранения информации, а именно:

- бесконтактное считывание информации, обеспечивающее доступ к содержанию документа без нарушения оригинала и возможность долговременного хранения информации;
- использование физических методов защиты записанной информации от механических повреждений;
- реализация обратной совместимости на новых типах устройств воспроизведения информации;
- использование режима однократной записи и многократного считывания, при котором сделанная запись не может быть стерта или заменена на новую (информация в архивных документах не подлежит какой-либо корректировке);
- использование надежного рельефного представления информации, которая может быть считана различными методами;
- возможность применения высокостабильных материалов для изготовления оптических дисков;
- использование универсальных защитных контейнеров для оптических дисков [1, 2]. Практически все иерархические структуры хранения данных предполагают использование оптических носителей для архивного хранения данных.

Анализ технологий для создания оптических носителей долгосрочного хранения информации. Следует отметить, что уже в первых разработках оптических дисков делались попытки реализовать технологию

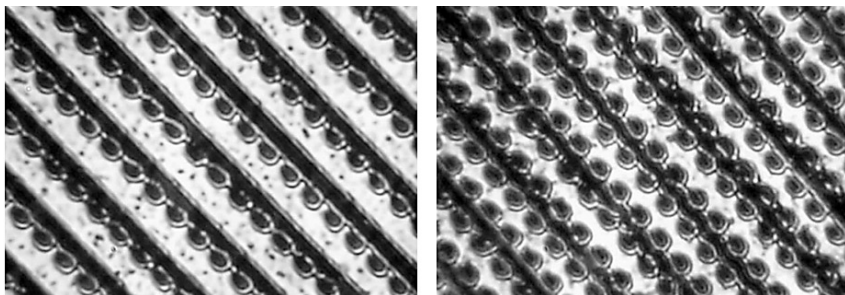


Рис. 1. Внешний вид зоны записи на оптическом носителе с разной плотностью записи

долгосрочного хранения данных [3]. Первые оптические дисковые носители создавались на основе стеклянных дисков с однослойным термочувствительным регистрирующим слоем, в которых широко применялась перфорационная запись на тонких пленках стеклообразных халькогенидных полупроводников [4]. Проведенные нами исследования образцов оптических стеклянных дисков с регистрирующими средами такого типа показали, что после хранения в течение 25–30 лет в неоттапливаемых помещениях сохранились форма и размеры пиков [5] рис.1.

Более чем тридцатилетний период оптической записи связан с широким использованием штампованных из поликарбоната компакт-дисков, которые стали средством массового распространения информации в цифровом виде. Такие диски из-за характеристик используемых в них материалов принципиально не могли обеспечивать долговременного хранения данных (в первую очередь из-за низкой временной стабильности поликарбоната [6]), хотя достаточно широко использовались для создания архивных копий. В используемых в архивах компакт-дисках с однократной записью применяются в качестве регистрирующей среды тонкие пленки органического красителя, имеющие низкие температуру плавления и коэффициент отражения. Для получения высоких значений сигналов считывания в таких носителях применяют металлический отражающий слой, характеризующийся слабой адгезией к слою органического красителя, что приводит к расслоению носителя при резких изменениях температуры, что является одной из основных причин выхода из строя оптических носи-

телей с однократной записью. Часть технических решений, а именно изготовление подложек из высокостабильных материалов, осуществление записи данных в однослойной регистрирующей среде с высокостабильным материалом, нашли применение в дальнейших разработках носителей информации долгосрочного хранения данных. Главным направлением повышения надежности хранения данных на оптических носителях с однократной записью была разработка специальных регистрирующих сред. В оптических носителях UDO (разработчик компания Plasmon) однократная запись осуществлялась на регистрирующих средах с необратимыми фазовыми переходами. Гарантированный срок хранения данных на таких носителях составляет 50 лет [7].

Большой срок хранения данных прогнозируется на оптических носителях с однослойной металлокерамической регистрирующей средой (фирменное название М-диски). Материал регистрирующего слоя имеет достаточно высокий коэффициент отражения, что исключает необходимость использования отражающего металлического слоя. В таких дисках не решена проблема, связанная с нестабильностью характеристик используемых подложек из поликарбоната. Ожидаемая долговечность М-дисков составляет более тысячи лет при температуре хранения 25 °С и относительной влажности окружающей среды 50 %, однако уже при температуре 40 °С и относительной влажности 70 % ожидаемая долговечность составляет 53 года [8]. Национальный институт стандартов и технологий (NIST) США определил срок хранения для М-диск в 1000 лет (буква М в названии означает Millenium, то есть тысячелетие), поликарбонат выдерживает сильные перепады температур только в течение короткого промежутка времени [9].

Много внимания уделялось созданию технологии изготовления оптических носителей типа ROM, которые могли обеспечить срок хранения данных несколько сотен лет в жестких климатических условиях. В частности был разработан носитель, который состоит из вольфрамовой подложки с микрорельефной структурой, герметизированной нитридом титана; заявленная долговечность такого носителя составляет более 1 млн лет [10]. Для обеспечения долгосрочного хранения данных на оптических носителях целесообразно использовать высокостабильные монокристаллические материалы для изготовления подложек. Для создания оптических носителей долгосрочного хранения данных предлагается в качестве подложек использовать кварц [11-14] и моно-

кристаллический сапфир [15-18]. На некоторых типах кварцевых носителей предлагается организовывать многослойную однократную (режим WORM) запись данных, которая осуществляется сверхкороткими (фемтосекундными) лазерными импульсами [12, 13]. Информацию на поверхности высокостабильных монокристаллических материалов предлагается записывать как в аналоговом [10, 16, 17], так и в цифровом виде [15, 18].

Сапфировые диски для носителей долгосрочного хранения данных.

Создание оптических дисков долгосрочного хранения данных целесообразно осуществлять с использованием подложек из высокостабильных материалов. Максимальные сроки хранения данных могут быть обеспечены при изготовлении подложек из монокристаллических материалов, в первую очередь сапфира, сохраняющего свои свойства до 2050 °С. Использование сапфира в качестве подложек оптических дисков позволяет создавать уникальные носители для долгосрочного хранения данных, которые характеризуются высокой устойчивостью к механическим повреждениям, не подвержены воздействию химически активных сред и способны выдерживать температуру 1000°С и более. Ни один из существующих цифровых носителей не способен обеспечить хранение данных в таких условиях. Возможности создания сапфировых носителей информации способствует то, что сегодня освоено массовое производство синтетических монокристаллов сапфира и полированных подложек с заданной кристаллографической ориентацией. Единственным анонсируемым сегодня сапфировым носителем, способным обеспечить долгосрочное хранение данных и ориентированным на массовое производство, является носитель, изготавливаемый по проекту La Nanoforme [16]. Предполагается изготовление оптических сапфировых носителей различных диаметров от двух до четырех дюймов. Информация записывается на носитель в аналоговой форме (в виде изображений). Запись данных на такой носитель осуществляется фемтосекундными импульсами сфокусированного лазерного излучения с последующим жидкостным селективным травлением, в результате которого формируется микрорельфная структура на поверхности подложки носителя информации. Использование аналоговой формы представления данных в оптических носителях долгосрочного хранения данных позволяет использовать различные системы считывания записанной информации, включая оптические микроско-

пы, однако не позволяет реализовать воспроизведение данных на стандартных устройствах. Применение сапфира в качестве подложки для дисков для долгосрочного хранения информации было очевидно, однако наличие оптической анизотропии монокристалла сапфира препятствовало созданию цифрового оптического сапфирового диска. При воспроизведении данных через подложку из монокристаллического сапфира возникает проблема связанная со значительным двулучепреломлением ($n_0 = 1,78038$ и $n_e = 1,77206$, $\lambda = 0,442$ мкм). Для компенсации влияния двулучепреломления, приводящего к увеличению диаметра сфокусированного пятна предложено использовать компенсирующую пластинку из монокристаллического кварца, расположенную между фокусирующим объективом и подложкой носителя информации. Ввиду того, что разность между показателями преломления обыкновенного и необыкновенного лучей имеет приблизительно такое же значение как и для сапфира, но имеет противоположный знак,

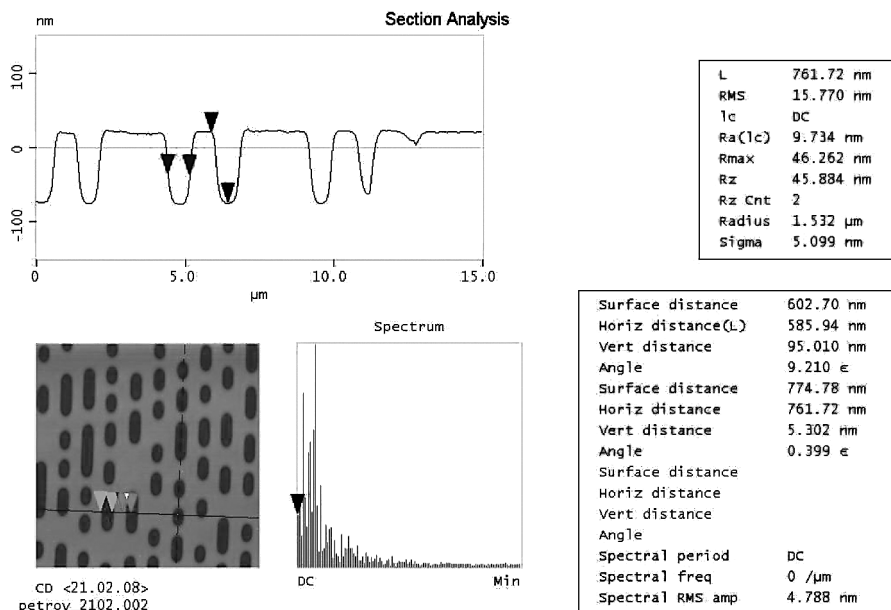


Рис.2. Зона записи на поверхности сапфирового диска

удалось скомпенсировать размытие сфокусированного через сапфировую подложку излучения, которое использовалось для воспроизведения данных.

Размещение кварцевой компенсационной пластинки толщиной 0,5 мм в оптическом канале стандартного DVD плеера позволяет считывать информацию через подложку из сапфира толщиной 0,7 мм. Проведенные эксперименты показали возможность компенсации оптических искажений, возникающих при фокусировке лазерного излучения через сапфировую подложку, а главное – отсутствие ограничений на создание дисков долговременного хранения данных. Воспроизведение записанных данных осуществляется на проигрывателях оптических дисков с небольшой модернизацией, которая заключается в размещении дополнительной фазовращающей пластинки, расположенной между фокусирующей линзой и носителем информации для компенсации явления двойного лучепреломления в сапфировой подложке [18]. Микрорельефные структуры получают на поверхности сапфировых подложек в результате плазмохимического травления (рис. 2).

Запись информации на сапфировый диск осуществляется на станции лазерной записи дисков-оригиналов, используемой в производстве компакт-дисков.

ВЫВОДЫ

Создание оптических носителей долгосрочного хранения данных может основываться на использовании микрорельефной записи информации на сапфировых подложках. Запись данных производится в форматах, используемых при записи информации на компакт-диски. Использование сапфировых оптических дисков позволит организовать долгосрочное хранение электронной документации без применения сложных и дорогостоящих технологических переходов из цифровой формы в аналоговую и обратно, а также повысит защищенность электронной информации от потерь, несанкционированного доступа и внесения изменений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров В.В., Пузиков В.М. Оптические диски для долговременного хранения информации / В.В. Петров, В.М. Пузиков, А.А. Крючин и др. // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. – 2009. – Т. 7, №3. – С. 825–832.
2. Подойницын В.А. Проблемные вопросы архивного хранения аудиовизуальных документов на оптических дисках / В.А. Подойницын, В.М. Козырев, И.В. Пахомова // Страховой фонд документации. – 2014. – №2 (17). – С. 22–32.
3. Петров В.В. Оптико-механические запоминающие устройства / В.В. Петров, А.А. Крючин, А.П. Токарь и др. Отв. ред. Додонов А.Г.; АН Украины. Ин-т проблем регистрации информации. – Киев.: Наук. думка, 1992. – 152 с. – ISBN 5-12-002345-2.
4. Петров В.В. Надщільний оптичний запис інформації / В.В. Петров, А.А. Крючин, С.М. Шанойло, В.Г. Кравець, І.О. Косско, Є.В. Беляк, А.С. Лапчук, С.О. Костюкевич: – Національна академія наук України, Інститут проблем реєстрації інформації. – Київ: НАН України, 2009. – 282 с. – ISB № 978-966-02 – 5027
5. Petrov V.V., Krychyn A.A., Gorbov I.V., Kossko I.O., Kostyukevych S.O., Analysis of properties of optical carries after long-term storage // Semiconductor Physics, Quantum Electronics and optoelectronics. – 2009. – V. 12. – № 4. – P. 399-402.
6. Nikles D.E. Accelerated aging studies and the prediction of the archival lifetime of optical disc media / D.E. Nikles, J.M. Wiest // Recent Advances in Metrology, Characterization, and Standards for Optical Digital Data Disks: Proc. SPIE 3806, 18 Jule 1999, Denver, CO, USA – P. 30.
7. Plasmon News. First Real-Time Tests Help Determine Security of Data Stored on WORD Media [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.plasmon.com>. – Название с экрана.
8. Summary Report by ISO/IEC 10995 Test Program Performed by Millenniata on M-DISCTM DVD [электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.mdisc.com/uploads/M-DISC_1sheet_Test_Summary.pdf. – Название с экрана.
9. Изучаем накопители для длительного хранения данных [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ichip.ru/izuchaem-nakopiteli-dlya-dlitelnogo-hraneniya-dannih.html>. – Название с экрана.
10. Towards Gigayear Storage Using a Silicon-Nitride/Tungsten Based Medium / J. Vries, D. Schellenberg, L. Abelman [et al.] // Arxiv.org. – 2013. – Article ID arXiv:1310.2961v1. – 19 p.
11. Hitachi claims glass data storage will last millions of year [электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.theregister.co.uk/2012/09/24/hitachi_glass_storage/. – Название с экрана.

12. 5D Data Storage by Ultrafast Laser Nanostructuring in Glass / J. Zhang, M. Gecevičius, M. Beresna [et al.] // CLEO: Science and Innovations paper: CTh5D.9 (2013).
13. Ultrafast Manipulation of Self-Assembled Form Birefringence in Glass / Y. Shimotsuma, M. Sakakura, P.G. Kazansky [et al.] // Adv. Mater. – 2010. – Vol. 22. – P. 4039–4043.
14. Seemingly Unlimited Lifetime Data Storage in Nanostructured Glass / J. Zhang, M. Gecevičius, M. Beresna [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2014. – Vol. 112, Article ID 033901. – 5 p.
15. Петров В.В., Семиноженко В.П. Новітня технологія довготривалого зберігання інформації на сапфірових оптичних дисках // Вісн. НАН України, 2014, № 4. – С. 24-32.
16. Fahrenheit 2451 - Preserve Your Data in a Sapphire Disk: Preserve your most precious memories for thousands of years [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://icrowdnewswire.com/2015/06/30/fahrenheit-2451-preserve-your-data-in-a-sapphire-disk-preserve-your-most-precious-memories-for-thousands-of-years-the-only-storage-medium-that-resists-fire-water-and-time/>. – Название с экрана.
17. New storage disc that secures data for 2.000 years + [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.abovetopsecret.com/forum/thread855634/pg1>. – Название с экрана.
18. Petrov V.V. Method of aberration compensation in sapphire optical disks for the long term data storage / V.V. Petrov, V.P. Semynozhenko, V.M. Puzikov, A.A. Kryuchyn, A.S. Lapchuk, Ye.M. Morozov, Y.O. Borodin, O.V. Shyhovets, S.M. Shanoylo // Functional Materials. – 2014. – Vol. 21 (1). – P. 105-111.

V. V. Petrov, A. A. Kryuchyn, S. M. Shanoylo

OPTICAL CARRIERS FOR LONG-TERM DATA STORAGE

The analysis methods for creating optical carriers for long-term storage is presented. It is shown that to solve the problem of long-term storage of strategic information can be using sapphire discs with the microrelief representation of data. The data on the recording submicron structures on the surface of the sapphire substrate and reproducing the recorded data by a focused laser beam.

Keywords: optical media, long-term storage of information, sapphire discs

В. В. Петров, А. А. Крючин

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ОПТИЧНИХ НОСІЇВ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ ЦИФРОВИХ ЕЛЕКТРОННИХ РЕСУРСІВ

Бібліотечна планета. 2015. № 1 (67). С. 18–20.

Стрімкий розвиток електронних цифрових технологій багато в чому змінив напрям діяльності бібліотек і радикально поміняв погляд на бібліотеку в сучасному світі. Все частіше в суспільстві звучать поняття: електронні інформаційні ресурси, цифрові документи, електронні бібліотеки. Зберігання, розвиток і раціональне використання національних інформаційних ресурсів є завданням державного значення. Електронна форма дозволяє зберігати інформацію найнадійніше і компактно, поширювати її набагато оперативніше і ширше [1].

Швидко зростають як кількість електронних бібліотек так і обсяги представленої в них інформації. Зростання обсягів інформації відбувається за рахунок нових надходжень, а також за рахунок послідовної роботи по оцифруванню раніше створених фондів. Планується перевести до 2015 року 50 % всіх бібліотечних фондів Росії в цифрову форму [2].

Запропоновано і реалізовано декілька структур електронних бібліотек, які успішно функціонують [3]. При будь-якій структурі електронної бібліотеки однією з основних проблем залишається зберігання інформації. З нею бібліотеки стикаються якщо не на початку створення колекції, то через деякий час – неминуче. Необхідно забезпечити не лише зберігання електронних документів, але і можливість їх тривалого використання в умовах технологій, що стрімко розвиваються.

Для визначення вимог до систем і носіїв довготермінового зберігання необхідно, в першу чергу, оцінити об'єм інформації, представленої в електронних бібліотеках і архівах.

Нижче наведені як приклад об'єми даних, представлених в деяких електронних бібліотеках і архівах різного рівня [1].

Об'єми даних в електронних бібліотеках і архівах

| Бібліотека | Електронний ресурс | Об'єм фондів, од. зберігання |
|---|---------------------|------------------------------|
| Електронні бібліотеки | | |
| Бібліотека Конгресу США | 10 Тбайт | $134 \cdot 10^6$ |
| Національна бібліотека Данії | 236 Тбайт | |
| Російська державна бібліотека | 162 Тбайт | $43,1 \cdot 10^6$ |
| Національна бібліотека Білорусі «Електронний архів національної періодики» (ЕАНП) | 300 Гбайт | $38,813 \cdot 10^3$ |
| Національна бібліотека України імені В.І. Вернадського | ≈ 2 Тбайт | $15 \cdot 10^6$ |
| Електронні архіви | | |
| Архів австралійського сегменту Інтернет (PANDORA) | ≈ 7 Тбайт | $200 \cdot 10^6$ |
| Архів Білорусі | 735 Гбайт | $735 \cdot 10^3$ |
| Архів ГНПП «Геоінформ Україна» | ≈ 160 Гбайт | $184 \cdot 10^3$ |

Слід зазначити, що об'єм даних, представлених в електронному вигляді, постійно збільшується. Наприклад, в Бібліотеці Конгресу США щодня сканується від 75 до 200 документів, фонд електронних документів Французької національної бібліотеки щорік зростає на 150 тисяч документів.

Одним з основних технічних рішень при організації зберігання даних є використання ієрархічної структури запам'ятовуючих пристроїв. Проблему довготермінового зберігання цифрових документів потрібно починати вирішувати на етапі їх створення. Більше 65 % вартості технологічного процесу життєвого циклу цифрових документів від створення до збереження складає саме забезпечення зберігання, і з часом ця доля збільшуватиметься. Не можна вирішувати проблему зберігання окремо, вона має бути зв'язана в єдиний технологічний цикл

створення – обробки – зберігання – використання цифрових документів [4].

Практично всі ієрархічні структури зберігання даних передбачають використання оптичних носіїв для архівного зберігання даних. Сьогодні найпопулярніший спосіб зберігання даних – це використання DVD-дисків. Проте 43 % користувачів зберігають свої файли на носіях, термін зберігання ще менший, ніж в оптичних дисків [5]. За даними, опублікованими асоціацією OSTA (Optical Storage Technology Association), лише 47 % DVD з одноразовим записом забезпечують термін зберігання більше 15 років, деякі носії цього типу – лише 1,9 років. Запис на DVD-диски відбувається з використанням методів оптичної або електронної мікроскопії, і якщо настане така необхідність, то прочитати дані з подібного носія можливо при створенні мікрорельєфних структур. Але для тривалого зберігання диски не варто використовувати в основному через те, що чинники довкілля згубно впливають на компоненти, з яких виготовлений диск.

Розроблені архівні сховища даних на оптичних дисках ємністю більше 34 Тбайт з терміном зберігання більше 50 років [6]. Найчастіше при виборі типів оптичних носіїв обмежуються найзагальнішими рекомендаціями типу:

- необхідно використовувати носії відомих виробників;
- застосовувати носії різних типів.

Проводяться численні дослідження по створенню спеціальних носіїв з одноразовим записом для архівного зберігання. У носіях з одноразовим записом пропонується використовувати спеціальні барвники з більш високими температурами фазових переходів і фоточутливими матеріалами з незворотними фазовими переходами, а також відбиваючі шари, що містять золото [7].

У компакт-дисках з одноразовим записом термін служби носія визначається в основному змінами характеристик реєструвального середовища (в якості котрих найчастіше використовують органічні барвники). Реєструвальне середовище найбільш чутливе до підвищеної вологості. За різними оцінками довговічність компакт-дисків може становити від 30 до 50 років. Оцінки базуються на прискорених тестах старіння компакт-дисків при підвищених температурі і вологості.

Для забезпечення довготермінового зберігання даних створюються і вже використовуються професійні оптичні диски. Їх головною особливістю є використання високостабільних матеріалів, як для створення

підкладок, так і інформаційних шарів. Першим зразком професійних оптичних дисків для архівного зберігання є диски типу UDO (ultra density optical – надщільний оптичний). Такі диски розробила і випускає компанія Plasmon. UDO-носії можуть бути використані в двох режимах: при реверсивному записі або записі WORM. Процес запису в режимі WORM відбувається за рахунок зміни структури матеріалу реєструвального середовища на молекулярному рівні, він гарантує неможливість зміни записаної інформації на носіях UDO. Ємність 5,25-дюймового UDO-носія становить 30 Гбайт, а гарантований термін зберігання даних перевищує 50 років. Найвища для сучасних оптичних носіїв щільність запису досягається за рахунок використання лазерів з довжиною хвилі 405 нм. У 2006 році завершилася розробка UDO-носія ємністю 60 Гбайт, а в 2008 році – 120 Гбайт. Передбачено, що пристрої запису/відтворення інформації для цих носіїв задовольнятимуть вимогам зворотної сумісності. Запис і відтворення даних з UDO-носіїв вимагає застосування спеціальних пристроїв, що відрізняються від системи запису/відтворення даних з компакт-дисків.

Інший, на наш погляд, перспективніший напрям досліджень полягає в удосконаленні технології виготовлення компакт-дисків, яка б дозволила істотно збільшити гарантований термін зберігання інформації, з одного боку, а з іншого – зберегти можливість читання їх стандартними пристроями відтворення даних компакт-дисків.

Підвищення гарантованого терміну зберігання даних досягається за рахунок того, що запис даних здійснюється у вигляді мікрорельєфної структури в шарі високостабільного матеріалу. Температура плавлення цього матеріалу в 2-3 рази перевищує температуру плавлення органічних барвників, застосованих як реєструвальне середовище в компакт-дисках з одноразовим записом. Фактично пропонується структура носія інформації перших оптичних дисків WORM, в яких широко застосовувався перфораційний запис на тонких склоподібних халькогенідних напівпровідниках [8]. Проведені дослідження зразків оптичних скляних дисків з реєструвальними середовищами такого типу показали, що після зберігання протягом 25-30 років в неопалювальних приміщеннях форма і розміри пітів збереглися [9].

Для істотного підвищення термінів служби оптичних носіїв пропонується використовувати носії, в яких застосовуються підкладки з високостабільних матеріалів. Одним з варіантів виготовлення таких носіїв є використання металевих нікелевих підкладок. Фактично для

довготермінового зберігання інформації пропонується використовувати нікелеві штампи, які застосовуються при тиражуванні компакт-дисків [10, 11, 12]. Копія матриці, яка використовується для видання компакт-диска, передається для архівного зберігання [11]. Така технологія довготермінового зберігання даних успішно застосовується в ряді країн для зберігання мультимедійної інформації.

Передбачається, що такі носії виготовляються на спеціалізованих підприємствах на замовлення архівних установ і бібліотек. Пропозиція виготовляти носії для довготермінового зберігання на спеціалізованих підприємствах розширяє кількість можливих технологій виготовлення носіїв. Зокрема, пропонується виготовляти носії з голографічним записом з терміном зберігання більше 50 років [7].

На сьогоднішній день німецька фірма Syylex пропонує диски із спеціального скла «Glassmasterdisc», які здатні зберігати записану інформацію впродовж 1000 років (як гарантують виробники таких дисків). Скло, яке є в основі конструкції даних дисків, стійке до хімічних реагентів. Вартість самого диска становить 150 євро, а його виготовлення здійснюється в індивідуальному порядку протягом 5–10 днів.

Для підвищення гарантованих термінів зберігання даних на оптичних носіях пропонується використовувати в якості підкладок більш стабільні матеріали з високими температурами плавлення, такі як кварц [13] і сапфір [13]. При розробці таких носіїв головна увага приділяється не досягненню високої щільності запису і ємності носіїв, а створенню пристроїв, що забезпечують гарантоване довготермінове зберігання даних. Одна з технічних проблем, яка виникає при застосуванні в носіях інформації підкладок з кристалічних матеріалів, полягає в тому, що оптична анізотропія матеріалу підкладок призводить до розмиття сфокусованої плями. Це розмиття, як показали проведені нами дослідження, можна усунути за допомогою спеціальних компенсуючих оптичних елементів [13]. Використання таких елементів доцільне і в оптичних носіях, в яких застосовується сапфірові захисні диски, крізь які здійснюється відтворення даних [13].

Постійно при створенні систем довготермінового зберігання даних виникає питання – чи зможемо ми прочитати дані при виході з ладу пристроїв відтворення [14].

У зв'язку з тим, що проблема довготермінового зберігання даних в цифровому вигляді далеко ще не вирішена, пропонується організувати зберігання даних на мікрофільмах і на спеціальних кварцових і сапфі-

рових носіях в аналоговій формі [15,16]. Передбачається, що така форма представлення даних дозволить надійніше відтворювати дані при зміні операційних систем або повній зміні пристроїв відтворення даних.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Крючин А.А.* Технологии долгосрочного хранения данных в электронных библиотеках и архивах / А.А. Крючин, И.В. Горбов, Н.В. Солонина // Библиотеки национальных академий наук: проблемы функционирования, тенденции развития. 2013. Выпуск №11. С. 170-181.
2. «Стратегия развития информационного общества в Российской Федерации» от 7 февраля 2008 г. № Пр-212 // РГ. 2008. 16 февр. 16 полоса.
3. *Шухарт С.* Как организовать долговременное хранение данных / С. Шухарт. Сети и Системы связи. 2003. № 12. С. 3–5.
4. *Шварцман М. Е.* К вопросу о долгосрочном сохранении цифровой информации / М. Е. Шварцман [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.benran.ru/Magazin/cgi-bin/Sb_07/pr_07.exe?!5!. Загл. с экрана.
5. Изучаем накопители для длительного хранения данных. CHIP Online Россия. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ichip.ru/stati/testy-i-obzory/2012/06/nakopiteli-dlya-dlitelnogo-hraneniya-dannyh>
6. Способствовать информационному и технологическому прогрессу Общества и Государства [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.elar.ru/products/>. Загл. с экрана.
7. Analysis of the plastic substrates, the reflective layers, and the adhesives of today's archival – grade DVDs / Guilin Jiang, Felipe Rivera, Supriya Kanyal, Robert C. Davis, Richard Vanfleet, Barry M. Lunt, Matthew R. Linford // Optical Data Storage. 2010. 7730. P. 7730N-1– 7730N-8.
8. *Петров В.В.* Надшільний оптичний запис інформації / В. В. Петров [та ін.] ; відп. ред. О.Г. Додонов ; Ін-т проблем реєстрації інформації НАН України. К. : НАН України, 2009. 282 с.
9. *Petrov V.V.* Analysis of properties of optical carriers after long-term storage / V. V. Petrov, A. A. Kryuchin, I. V. Gorbov, I. O. Kossko, S. O. Kostyukevych // Semiconductor Physics. Quantum Electronics & Optoelectronics. 2009. V. 12, № 4. P. 399–402.
10. *Toppin E.* Setting a new standard in permanent archival storage / E. Toppin // Digital 2Disc. – 2010. P. 42–44.
11. Металеві носії для довготермінового зберігання інформації / В. В. Петров, А. А. Крючин, С. М. Шанойло, Л. І. Крючина, І. О. Косско. К. : ІПРІ НАН України, 2005. 132 с.

12. *Ефимов Д. А.* Скрижали 21 века – применение металлических носителей для сверхдолгого хранения оцифрованных библиотек [Электронный ресурс] / Д. А. Ефимов // Библиотеки и информационные ресурсы в современном мире науки, культуры, образования и бизнеса: материалы конф. Электрон. дан. М.: ГПНТБ России, 2010. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). Систем. требования: IBM PC, Windows 2000 или выше. Загл. с этикетки диска. ISBN 978-5-85638-139-8. № гос. регистрации 0321000673.
13. *Петров В.В.* Технології створення перспективних оптичних носіїв / А.А. Крючин, С.М. Шанойло, А.С. Лапчук // Тези доповідей міжнародної конференції «Сучасна інформатика: проблеми, досягнення та перспективи розвитку» Київ, 2013. С.253-254.
14. *Когаловский М. Р.* Тенденции развития технологий управления информационными ресурсами в электронных библиотеках / М. Р. Когаловский // Труды 8^{ой} Всероссийской научной конференции «Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции» RCDL'2006. Суздаль, 2006. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://rcdl.ru/proceedings.php?year=2006>.
15. *Irie M.* Standardized Life Expectancy of High-Speed Recordable Optical Disks / M.Irie, Y.Okino // IEEE Transactions on magnetics. 2007. V 41. № 2. P. 864–866.
16. *Устинов В.* Хранение данных на CD- и DVD-дисках: на наш век хватит? / В. Устинов // Broadcasting. Телевидение и радиовещание. 2006. № 4. С. 54–59.

**В. В. Петров, А. А. Крючин, С. М. Шанойло,
Є. В. Беляк, О. Г. Мельник**

ТЕХНОЛОГІЇ СТВОРЕННЯ ОПТИЧНИХ НОСІЇВ ДЛЯ СИСТЕМ ДОВГОТЕРМІНОВОГО ЗБЕРІГАННЯ ДАНИХ

Реєстрація, зберігання і обробка даних. 2017. Т. 19. № 1. С.3-13.

Визначено переваги систем довготермінового зберігання даних, в яких використовуються носії з оптичним зчитуванням, що виготовлені з високостабільних матеріалів. Показано, що суттєво збільшити строки зберігання даних на оптичних носіях можливо з переходом на використання підкладок з неорганічних матеріалів. Заміна матеріалів фоточутливих шарів оптичних носіїв з одноразовим записом (WORM-носії) не дозволяє в повному обсязі реалізувати потенційні можливості оптичних методів запису із забезпечення довготермінового зберігання даних. Вказано, що форма представлення даних на оптичних носіях довготермінового зберігання повинна допускати можливість відтворення даних різними методами.

Ключові слова: оптичні носії, довготермінове зберігання інформації, представлення даних, підкладки, високостабільні матеріали, реєструвальні середовища.

ВСТУП

Задача збереження інформації є однією з актуальних задач інформаційних технологій, при вирішенні якої необхідно забезпечити надійне та компактне зберігання як уже накопиченої, так і нової інформації. Питання довготермінового зберігання інформації завжди привертало увагу людства і зараз залишається одним із найважливіших завдань архівних установ і бібліотек. Сучасні технології довготермінового

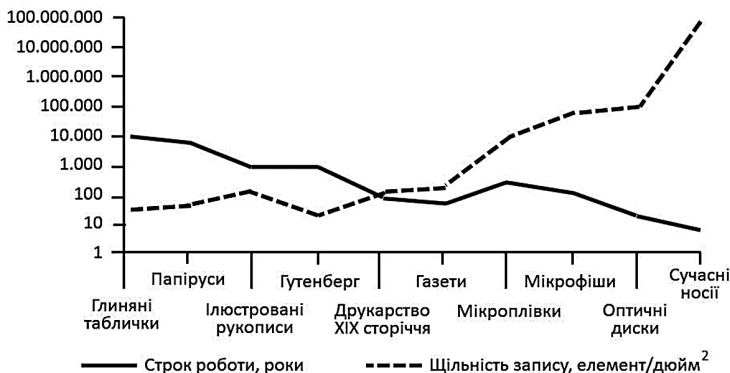
зберігання інформації базуються на методі міграції даних, яка при орієнтації на використання жорстких магнітних дисків для довготермінового зберігання інформації передбачає постійний (кожні 4–5 років) перезапис даних на нові носії інформації [1]. Технологія довготермінового зберігання інформації з використанням носіїв інформації з малим строком служби і постійним проведенням процесу міграції є високовитратною і не забезпечує високої надійності зберігання даних. Збереження даних у цифровій формі піднімає проблеми принципово іншої природи, які додаються до проблем збереження традиційних документальних матеріалів. Одна з проблем полягає в тому, що носії інформації для зберігання документів у цифровій формі мають менший термін зберігання даних навіть в ідеальних умовах, такі носії вразливі до катастрофічних втрат записаної інформації. Загрози втрати інформації, яка зберігається на сучасних цифрових носіях, якісно відрізняються від проблем зберігання даних на традиційних носіях. Якість цифрових носіїв за певних умов може швидко погіршуватися, що робить терміни рішень і дій щодо запобігання втратам питанням років, а не десятиліть. Поліпшення стабільності характеристик, ємності, довговічності цифрових носіїв дозволить різко знизити вразливість цифрових матеріалів до впливу зовнішніх факторів і знизити витрати на зберігання даних [2]. Недовіра до можливостей цифрових носіїв забезпечувати високу надійність довготермінового зберігання даних у цифровому вигляді призводить до того, що у багатьох випадках не змінено законодавство, яке передбачає необхідність паралельно з цифровими носіями зберігати в архівах паперові документи, в тому числі й описи документів. При цьому використання цифрових копій документів в архівах, у першу чергу, обумовлено необхідністю вирішення питання виконання пошукових запитів [10].

Відсутність високоємних носіїв з цифровим записом, які мають тривалий гарантований термін зберігання даних, призводить до того, що для архівного зберігання даних широко використовують мікрофільми з аналоговим способом запису. При використанні сучасних матеріалів для їхнього виготовлення і особливих умов зберігання мікрофільмів, вони можуть забезпечувати зберігання даних протягом сотень років [4, 5]. Таким чином, актуальною задачею є створення ефективної інфраструктури зберігання інформації, яка забезпечує отримання необхідної інформації, гарантує довготермінове та надійне зберігання даних.

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ СТВОРЕННЯ НОСІЇВ ДЛЯ СИСТЕМ ДОВГОТЕРМІНОВОГО ЗБЕРІГАННЯ ДАНИХ

Найбільш стійкими до руйнівного впливу часу виявилися ті пам'ятники письмової та образотворчої культури, які були виконані на твердих матеріальних носіях — каменях, метали, кераміці. Саме завдяки цьому до нас дійшли глиняні таблички шумерів (термін зберігання понад 4000 років), розшифровані єгипетські ієрогліфи («Розетський камінь», матеріал — блакитний мармур, термін зберігання понад 2000 років), давньоіндійські письмена (колона в Делі, матеріал — залізо, термін зберігання понад 1600 років). Зберігання інформації на твердих носіях тисячоліттями вважалося самим надійним способом зберегти знання протягом століть [6]. Вибір оптимальної технології зберігання даних може здійснюватися з використанням таких критеріїв: вартість, довговічність і строки міграції даних. Для носіїв інформації усіх типів з різними способами запису спостерігається загальна закономірність — зниження термінів зберігання даних при збільшенні щільності запису (наведені на рисунку) [7].

Головним обмежуючим чинником до визначення числа об'єктів, які необхідно зберігати тривалий час може бути вартість зберігання даних. Дослідники систем довготермінового зберігання інформації відзначають, що вартість організації процесу довготермінового зберігання даних є високою та багато в чому визначається вартістю і характеристиками використовуваних носіїв інформації.



Щільність запису інформації та терміни зберігання інформації на різних носіях [7]

Важливим критерієм для визначення ефективності систем зберігання даних є середня тривалість життя цифрових носіїв. Вибір носія з довготривалим строком зберігання даних для архівування цифрового контенту впливає не тільки на ціни, але і також на довгострокову безпеку об'єктів. Типові цифрові носії інформації мають очікувану тривалість життя від 3 до 10 років, при цьому реальний термін пошкодження інформаційної структури неможливо передбачити. Недовга тривалість життя носіїв, в поєднанні з неефективними та часозатратними процедурами резервного копіювання можуть призвести до втрати цифрового контенту, який підлягає довготривалому зберіганню. Третій критерій, який включає в себе термін служби носія інформації і пов'язані з цим витрати на цифрове збереження — це строки міграції даних. Кожен цифровий носій і будь-яка цифрова система має обмежений термін служби. З метою суттєвого збільшення строків збереження цифрових об'єктів, більшість цифрових носіїв інформації повинні бути поновлені, або інформація з них має регулярно переноситися на інші носії. Вартість переходу від одного покоління носіїв до іншого, або з одного виду носіїв на інший тип може становити значну проблему. Міграція буде включати вартість нових носіїв та нових систем, але вона повинна також включати витрати на персонал управління заміною і процесом перевірки, для того щоб переконатися, що в процесі переходу не спостерігається втрата даних або деградації носіїв [1]. Найбільш гостро питання довготермінового зберігання інформації стоїть для архівних фондів. На сьогодні, через відсутність наявних електронних носіїв, які б гарантували зберігання інформації більше ніж 100 років, перехід з аналогового подання даних (паперові документи) до цифрового є практично неможливим [3]. На жаль, сучасні носії даних не здатні забезпечити довгострокове зберігання даних. Пожежею у вежах-близнюках (Нью-Йорк, 11.09.2001 р.) було знищено абсолютно всі цифрові носії. У цьому випадку варто згадати про глиняні таблички шумерів, які в шостому столітті до нашої ери витримали пожежу в бібліотеці Ашшурбаніпала та збереглися до нашого часу [32].

Альтернативною технологією довготермінового зберігання даних може бути використання носіїв з тривалим гарантованим строком експлуатації, її перевага полягає в тому, що суттєво зменшуються витрати на зберігання даних за рахунок збільшення періоду міграції даних [1, 32].

ПОТЕНЦІЙНІ МОЖЛИВОСТІ ОПТИЧНИХ НОСІЇВ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОВГОТЕРМІНОВОГО ЗБЕРІГАННЯ ДАНИХ

Протягом більше 35 років оптичні диски використовуються як архіви для тривалого зберігання найважливішої науково-технічної інформації, патентної і технічної документації, медичних і юридичних документів, рентгенівських знімків тощо. Зараз основною областю використання оптичних дисків є архівація даних.

Успішне використання оптичних дисків для довготермінового зберігання даних базується на основі можливостей і характеристик оптичного запису. Оптичні носії для довготермінового зберігання даних мають суттєві переваги порівняно з іншими технологіями зберігання даних, а саме:

1) запис інформації на оптичні диски є безконтактним, що виключає пошкодження поверхні носія. Такий запис даних має істотну перевагу, коли необхідно забезпечити довготермінове зберігання даних. Відносна простота способу відтворення означає, що майбутні оптичні системи відтворення легко можуть бути адаптовані в міру необхідності, щоб прочитати дані, які постійно зберігаються на оптичних дисках [8];

2) подання інформації на поверхні оптичних носіїв інформації у вигляді мікрорельєфу структур дозволяє зчитувати записану інформацію за допомогою різних методів. Записані зображення можуть бути проаналізовані візуально з використанням оптичних приладів;

3) для виготовлення оптичних носіїв можуть бути використані високостабільні матеріали, зміни властивостей яких відбуваються при температурі вище 2000 °C;

4) відтворення даних з оптичних дисків не вимагає спеціального програмного забезпечення;

5) запис даних на оптичні диски здійснюється у форматах, які забезпечують сумісність записаних дисків різних типів;

6) пристрої відтворення інформації з оптичних дисків, створені з метою забезпечення зворотної сумісності, яка була реалізованою для приводів «Blu-Ray Disc», що зчитують носії у форматі CD та DVD;

7) характеристики оптичних дисків створюють можливості для забезпечення високої надійності довготермінового зберігання даних у широкому діапазоні температур і вологості. Компакт-диски зберігають записану інформацію, як правило, довше, ніж інші цифрові носії. Ба-

гаторічний досвід використання компакт-дисків довів, що їхнє використання є ідеальним методом для архівації даних, тексту та зображень у цифровій формі. Дослідження довготермінового зберігання даних на компакт-дисках показали, що нікелеві штампи, які використовуються для копіювання компакт-дисків, можуть забезпечити довготривале зберігання даних [9, 10].

Незважаючи на невисоку швидкість запису-відтворення, оптичні диски досить ідеально підходять для архівування важливих даних і вони зберігають сильні позиції в архівній справі [11]. Як правило, виробники оптичних носіїв WORM прогнозують п'ятирічний строк придатності для чистих дисків і 20–30 років життя після запису. Ці строки очікуваної тривалості життя базуються на результатах випробувань носіїв різних виробників [12]. Використання оптичних дисків WORM являє собою певний ризик, хоча їхнє використання поширено особливо серед малих архівних установ. Розробка оптичних дисків для довготермінового зберігання даних була предметом інтенсивних досліджень в останні роки.

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ТЕРМІНІВ ЗБЕРІГАННЯ ІНФОРМАЦІЇ НА ОПТИЧНИХ НОСІЯХ З ПЛАСТИКОВИМИ ПІДКЛАДКАМИ

Існуючі оптичні диски не можуть забезпечити необхідний рівень надійності і час збереження даних через низьку стабільність полікарбонатної підкладки [13]. Металевий відбивальний шар компакт-диска характеризується слабкою адгезією до підкладки з полікарбонату, що призводить до швидкого розшарування носія під час використання, особливо, при раптових змінах температури. Диски типу WORM та RW непридатні для архівного зберігання даних через те, що в їхньому інформаційному шарі використовуються для запису даних нестабільні органічні барвники (ціаніни, фталоціаніни і азобарвники) [11]. Для збільшення довговічності оптичних носіїв з пластиковими підкладками було запропоновано та розроблено багато технічних рішень. Розроблялися технології підвищення строків зберігання даних на оптичних носіях різних типів. Головним напрямком підвищення надійності зберігання даних на оптичних носіях з одноразовим записом була розробка спеціальних рееструвальних середовищ. Хоча органічні барвники

успішно використовувалися для запису даних на оптичних дисках, в останні роки також широко розглядаються для запису неорганічні матеріали [14]. Лазерні написи на скляних неорганічних матеріалах можуть витримувати температуру до 1000 °C і в принципі підтримувати стабільність даних і можливість їхнього відтворення до тисячі років [15]. Як один із матеріалів, які на даний час широко використовуються, є неорганічний матеріал, який включає в себе оксид паладію (Pd) [14]. Під дією сфокусованого лазерного випромінювання змінюється пропускання неорганічного реєструвального шару, який також включає в себе оксид Pd [14]. Крім того, використовується для запису неорганічний шар, який включає в себе оксиди з індію та олова [14].

У професійних оптичних дисках UDO, що призначені для довготермінового зберігання даних, використовують технологію запису на незворотних фазових переходах у неорганічних матеріалах, яка може забезпечити строк зберігання даних понад 50 років. Для того щоб захистити UDO-носії від фізичних ушкоджень і забруднень (пилу, відбитків пальців і т.д.), диск розміщено в міцному стандартному ISO 5,25-дюймовому картриджі [16]. Уже в перших розробках оптичних дисків WORM намагалися реалізувати технологію довготермінового зберігання даних [17]. Частина технічних рішень, а саме виготовлення підкладок з високостабільних матеріалів, здійснення запису даних у одношаровому реєструвальному середовищі з високостабільного матеріалу, знайшли використання у подальших розробках носіїв інформації довготермінового зберігання даних. Довговічність перших оптичних дисків складала 20–30 років завдяки змінам характеристик реєструвальних середовищ з халькогенідного скла і органічних барвників [18].

Альтернативний спосіб довготермінового зберігання даних на оптичних носіях передбачає використання одного шару з високим коефіцієнтом відбиття, на якому робиться запис, він також повинен мати високу адгезію до матеріалу підкладки [17]. Найбільший строк зберігання даних прогнозується на оптичних носіях з металокерамічним реєструвальним середовищем (фірмова назва М-диски). Використання термочутливого шару з високим коефіцієнтом відбиття дозволило не використовувати у М-дисках світловідбиваючі шари, що стало однією зі складових значного підвищення гарантованого строку зберігання даних [19]. Очікувана довговічність М-дисків складає понад тисячу років при температурі зберігання 25 °C і відносній вологості

оточуючого середовища 50 %, однак уже при температурі 40 °С і відносній волості 70 % очікувана довговічність складає 53 роки [19]. Національний інститут стандартів і технології (NIST) США визначив термін збереження для М-диска в 1000 років (буква М у назві означає Millenium, тобто тисячоліття), полікарбонат витримує сильні перепади температур лише протягом короткого проміжку часу [20]. Технологія виготовлення компакт-дисків, яка базується на використанні пластикових підкладок з рельєфними направляючими доріжками, забезпечує технологічність виготовлення носіїв і можливість зчитування даних на порівняно простих пристроях. Така технологія забезпечує можливість масового виготовлення дешевих носіїв інформації різних типів, проте не може бути використана для виготовлення носіїв довготермінового зберігання даних через невисоку стабільність матеріалів, що застосовуються при виготовленні компакт-дисків усіх типів. Спроби використання компакт-дисків для організації довготермінового зберігання даних показали недостатню надійність.

СТВОРЕННЯ ОПТИЧНИХ НОСІЇВ ДОВГОТЕРМІНОВОГО ЗБЕРІГАННЯ ІНФОРМАЦІЇ НА ОСНОВІ ВИСОКОСТАБІЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Проблема довготермінового зберігання даних вирішується створенням спеціальних носіїв інформації з оптичним зчитуванням, в яких використовується представлення даних у вигляді мікрорельєфних структур на поверхні високостабільних матеріалів (пропонується використовувати скляні [21], кварцеві [22, 23], кремнієві [24], нікелеві [25] або вольфрамові [26] підкладки). Носії довготермінового зберігання даних на основі високостабільних матеріалів повинні мати наступні властивості — високу стійкість до впливу підвищеної температури, водяного пару, електромагнітного випромінювання протягом тривалого періоду часу [27]. Технічні рішення, що пропонуються для створення технології довготермінового зберігання даних на оптичних носіях, засновані на використанні високостабільних матеріалів для підкладок носіїв інформації; так перші оптичні диски довготермінового зберігання мали у своїй основі підкладку із силікатного скла [21, 27].

На носіях з підкладками з високостабільних матеріалів використовують режим роботи ROM. Історичний досвід використання докумен-

тів показав, що носії виготовлені з таких матеріалів зберігали записану інформацію протягом століть. Носії з таких матеріалів створені на теперішній час мають істотно більшу щільність і швидкість запису. Такі носії суттєво відрізняються від стандартних компакт-дисків унаслідок особливостей технології їхнього виготовлення, що заснована на застосуванні підкладок з нестабільного полікарбонату, який з часом змінює фізико-хімічні властивості, особливо в процесі багаторазових відтворень записаної інформації [1].

Для довготермінового зберігання стратегічно важливої інформації запропоновано виготовляти підкладки оптичних носіїв із синтетичного сапфіру [28, 29]. Пропонується використовувати оптичні носії з сапфіровими підкладками двох типів: сапфірові підкладки використовують як захисний шар високостабільного металевого реєструвального середовища (платинового) [28], у другій конструкції інформація записується у вигляді мікрорельєфних зображень на поверхні сапфірової підкладки. Залежно від обраної оптичної системи відтворення може відбуватись як через підкладку сапфірового носія, так і збоку записаних зображень [29, 30]. Відтворення даних крізь прозору сапфірову підкладку забезпечує додатковий захист записаної інформації від забруднень, але вимагає розробки спеціальної оптичної системи компенсації аберацій, які виникають при проходженні сфокусованого оптичного випромінювання крізь анізотропну підкладку зі значним двоприменезаломленням [29].

Використання спеціальних оптичних носіїв дозволить значно збільшити час між проведенням міграції інформації для забезпечення гарантованого довготермінового зберігання даних. Нові розробки в області оптичних дисків для довготермінового зберігання даних відкривають нові можливості для більш повного задоволення мінливих потреб архівування даних з точки зору ємності та швидкості передачі даних [21–29].

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ГРАФІЧНОГО ПРЕДСТАВЛЕННЯ ДАНИХ НА НОСІЯХ ДОВГОТЕРМІНОВОГО ЗБЕРІГАННЯ

Однією з ключових проблем при створенні носіїв довготермінового зберігання даних є вибір форми представлення даних, яка би дозволяла їх інтерпретувати та використовувати для отримання необхідної

інформації. Такий вибір намагаються здійснити не тільки з технологічної точки зору, але і з використанням історичного досвіду застосування кодування інформації для передачі та збереження знань. Авторами роботи [7] пропонується запис інформації на носії довготермінового зберігання проводити шляхом розміщення на носії зменшених графічних або тестових зображень, які можуть зчитуватись оптичними системами. Перевагою такого способу подання інформації є те, що наступне відтворення інформації не вимагає використання спеціальних пристроїв зчитування та відповідного програмного забезпечення. Необхідна роздільна здатність оптичної системи для зчитування визначається використаним зменшенням зображень під час запису інформації. Таке представлення даних використане на сапфірових і металевих дисках [26, 30, 31].

На більшості розроблених носіїв довготермінового зберігання даних з підкладками з високостабільних матеріалів для запису інформації використовуються методи візуального кодування з використанням QR-кодів, які дозволяють відтворювати записану інформацію без використання спеціальних пристроїв зчитування, однак не забезпечують високої швидкості відтворення в автоматичному режимі [5–8]. Представлення даних на носіях довготермінового зберігання в QR-кодах і у вигляді мікрозображень здійснюється паралельно з використанням цифрового кодування, при якому може бути реалізована істотно більша щільність запису інформації [29, 32].

Запис інформації на носії, що виготовлені з високостабільних матеріалів, пропонується здійснювати у широковживаних форматах, які використовуються на компакт-дисках [33]. Такий вибір системи кодування базується на тому, що виготовлені та використовуються мільярди носіїв з таким методом представлення даних і, в разі необхідності, інформація може бути відтворена іншими методами, наприклад, методом тунельної скануючої мікроскопії.

Базовий метод відтворення даних з таких носіїв передбачає використання стандартних пристроїв відтворення даних з компакт-дисків, у тому числі з оптичних дисків довготермінового зберігання даних, таких як M-диск DVD або Blu-ray. Однак висловлюються побоювання, що навіть такі коди у віддаленому майбутньому важко буде розшифрувати [34].

ВИСНОВКИ

1. Задача забезпечення довготермінового зберігання накопиченої інформації на всіх етапах розвитку людської цивілізації є однією з найважливіших, вирішення якої забезпечувало розвиток суспільства. Для збереження знань, накопичених людством, на всіх етапах розвитку суспільства використовувалися найбільш передові технології. На даний час обсяг інформації, яка підлягає тривалому зберіганню щорічно зростає практично експоненціально, що робить задачу довготермінового зберігання документів ще більш складною і актуальною. Збільшенню обсягу документів, які підлягають тривалому зберіганню сприяє те, що все більша кількість типів документів визнається такими, що підлягають тривалому зберіганню. Довготривалому зберіганню обов'язково підлягає науково-технічна, медико-біологічна та генетична інформації, об'єкти національної культурної спадщини, стратегічно важлива інформація.

2. Використання у системах довготермінового зберігання інформації цифрових носіїв зі строками зберігання даних 5–10 років вимагає проведення постійного перезапису даних на нові носії, що суттєво збільшує вартість зберігання даних і зменшує надійність їхнього зберігання.

3. Технологія виготовлення компакт-дисків заснована на використанні пластикових підкладок з рельєфними направляючими доріжками, що забезпечує технологічність виготовлення носіїв і можливість зчитування даних на порівняно простих пристроях. Така технологія забезпечує можливість масового виготовлення дешевих носіїв інформації різних типів, проте не може бути використана для виготовлення носіїв довготермінового зберігання даних через невисоку стабільність матеріалів, що застосовуються при виготовленні компакт-дисків усіх типів. Спроби використання компакт-дисків для організації довготермінового зберігання даних показали недостатню надійність і довготривалість зберігання даних.

4. Перевага носіїв з оптичним зчитуванням виготовлених з високостабільних матеріалів і М-дисків полягає в тому, що вони не вимагають оновлення записаної інформації або міграції даних, що значно зменшує вартість зберігання даних. Довготривале зберігання інформації може бути забезпечене на спеціальних оптичних носіях інформації, виготовлених з високостабільних матеріалів, запис даних на які зроблено у форматах стандартних компакт-дисків.

ЛІТЕРАТУРА

1. Erickson C.L., Lunt B.M. Alternatives for Long-Term Storage Of Digital Information. URL: https://sites.lib.byu.edu/digitalpreservation/wp-content/uploads/sites/21/2015/11/iPres_poster_2015_resubmit2-Erickson_Lunt.pdf
2. Hedstrom M. Digital preservation: a time bomb for Digital Libraries. URL: https://pdfs.semanticscholar.org/1f78/ff102bc627e675a8df7db2d996_c69faad8cd.pdf
3. Шапбаров И. Перевод архивов в электронный вид — актуальная, но пока неразрешимая задача. *PC WEEK/RE*. 2015. № 6. С. 3—4.
4. Steffen W. Schilke Long-term archiving of digital data on microfilm. *Int. J. Electronic Governance*. 2010. Vol. 3. N 3. P. 237—253.
5. Alternative Storage Technologies. URL: <http://docplayer.net/3509007-Alternative-storage-technologies.html>
6. Ефимов Д.А. Скрижали 21 века — применение металлических носителей для сверхдолгого хранения оцифрованных библиотек. *Библиотеки и информационные ресурсы в современном мире науки, культуры, образования и бизнеса*. XVII Международная конференция «Крым 2010», 5—13 июня 2010 г.
7. The Preservation of Records, Knowledge and Memory (RK&M) Across Generations: Improving Our Understanding Workshop Proceedings 12—13 September 2012 NEA Headquarters, Issy-les-Moulineaux (France). URL: <https://www.oecd-nea.org/rwm/reports/.../rwm-r2013-3.pdf>
8. Система зчитування даних з оптичного носія: пат. 104961 Україна: МПК G11 B7/24. Опубл. 25.03.2014.
9. Petrov V.V., Kryuchyn A.A., Shanoylo S.M., Kryuchyna L.I., Kossko I.O. The Metal Carriers for Long-Term Storage of the Information: Exec. Ed. Dodonov O.G. (NAS of Ukraine, Institute for Information Recording, (Naukova dumka, Kiev, 2005) [in Ukrainian].
10. Петров В.В., Крючин А.А., Шанойло С.М. Горьов І.В., Морозов Є.М., Березін Б.О. Оптичні носії для довготермінового зберігання інформації. *Страховий фонд документації*. 2016. № 1(20). С. 44—55.
11. Jacobi J.L. Hard-core data preservation: The best media and methods for archiving your data. *PCWorld*. FEB 29, 2016. URL: <http://www.pcworld.com/article/2984597/storage/hard-core-data-preservation-the-best-media-and-methods-for-archiving-your-data.html>.
12. NARA/Long-Term Usability of Optical Media. URL: <http://cool.conservation-us.org/bytopic/electronic-records/electronic-storage-media/critiss.html>
13. Nikles D.E., Wiest J.M. Accelerated aging studies and the prediction of the archival lifetime of optical disc media. *Proc. SPIE*. 1999. **3806**. P. 30—36.
14. Optical information recording medium: patent 8,865,286 USA: МКИ G11B7/24. T. Hiroshi, M. Takeshi; заявл. 23.01.2012; опубл. 21.10.2014.

15. Min G., Xiangping L., Yaoyu C. Optical storage arrays: a perspective for future big data storage. *Light: Science & Applications* (2014)3, e177; DOI :10.1038/lsa.2014.58.
16. Plasmon News. First Real-Time Tests Help Determine Security of Data Stored on WORD Media. URL: <http://www.plasmon.com>.
17. Петров В.В. Крючин А.А., Токарь А.П. и др. Оптико-механические запоминающие устройства. Киев: Наук. думка, 1992. 152 с. ISBN 5-12-002345-2.
18. Petrov V.V., Kryuchin A.A., Gorbov I.V., Kossko I.O., Kostyukevych S.O. Analysis of pro-perties of optical carriers after long-term storage. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*. 2009. **12**(4). P. 399–402.
19. Summary Report by ISO/IEC 10995 Test Program Performed by Millenniata on M-DISCTM DVD. URL: http://www.mdisc.com/uploads/M-DISC_1sheet_Test_Summary.pdf
20. Изучаем накопители для длительного хранения данных. URL: <http://ichip.ru/izuchaem-nakopiteli-dlya-dlitelnogo-hraneniya-dannih.html>
21. Syylex permanent storage. Longevity tests. URL: http://www.syylex.com/longevity_tests.html
22. Kazansky P., Cerkauskaite A., Beresna M., Drevinskas R., Patel A., Zhang J., Gecevicus M. Eternal 5D data storage via ultrafast-laser writing in glass. *SPIE Newsroom*. 11 March 2016. DOI: 10.1117/2.1201603.006365
23. Successful read/write of digital data in fused silica glass with a recording density equivalent to Blu-ray. URL: <http://www.hitachi.com/New/cnews/month/2014/10/141020a.pdf>
24. Wafer-scale image archiving and receiving system: patent 8155427 USA: МКИ, G06F12/00. Ajay Pasupuleti; заявл. 14.12. 2007; опубл. 10.04.2012.
25. Heminger A.R., Robertson S.B. Digital Rosetta stone: A conceptual model for maintaining long-term access to digital documents. *J. Management Inf. Sys*. 2005. **21**. P. 11–35.
26. De Vries J., Schellenberg D., Abelman L. [et al.]. Towards Gigayear Storage Using a Silicon-Nitride/Tungsten Based Medium. URL: <https://arxiv.org/abs/1310.2961>
27. Norsam Technologies, Inc. Norsam Technologies, Inc. Ultra-High Density Analog and Digital Data Storage. URL: www.thic.org/pdf/Apr98/norsam.jbishop.pdf
28. Object provided with a graphics element transferred onto a support wafer and method of producing such an object: пат. WO 2009/092794 A2. A.-M. Rey (Fr), J.-F. Clerc (Fr), A. Soubie (Fr), L. Vandroux (Fr); заявл. 23.01.2009; опубл. 24.09.2009.
29. Petrov V.V., Semynozhenko V.P. Puzikov V.M., Kryuchyn A.A., Lapchuk A.S., Morozov Ye.M., Borodin Y.O., Shyhovets O.V., Shanoylo S.M. Method of aberration compensation in sapphire optical discs for the long term data storage. *Functional Materials*. 2014. Vol. 21. No 1. P. 105–111.

30. Rey A., Benzakour F. Preserve your most precious memories for thousands of years. *Fahrenheit 2451 — Preserve Your Data in a Sapphire Disk*. URL: <http://icrowdnewswire.com/2015/06/30/fahrenheit-2451-preserve-your-data-in-a-sapphire-disk-preserve-your-most-precious-memories-for-thousands-of-years-the-only-storage-medium-that-resists-fire-water-and-time>. July 14, 2015.
31. New storage disc that secures data for 2,000 years. URL: <http://www.abovetopsecret.com/forum/thread855634/pg1>
32. Петров В.В., Семиноженко В.П. Новітня технологія довготермінового зберігання інформації на сапфірових оптичних дисках. *Вісн. НАН України*. 2014. № 4. С. 24–32.
33. Petrov V.V., Kryuchyn A.A., Shanoylo S.M., Kossko I.O., Kravets' V.G. Methods of solving the problem of long-term information storage recorded in a digital form. *Rep. of the Nat. Acad. Sci. of Ukraine*. 2003. N 4. P. 52–58 [in Ukrainian].
34. Lunt B.M. How long is long-term data storage? Archiving 2011 Final Program and Proceedings. URL: http://www.imaging.org/site/PDFS/Reporter/Articles/REP26_3_4_ARCH2011_Lunt.pdf

V. V. Petrov, Ie. V. Beliak, A. A. Kryuchyn, A. V. Shikhovets

ANALYSIS OF METHODS FOR CREATING MEDIA FOR LONG-TERM DATA STORAGE

*IEEE 2nd International Conference on Advanced Trends
in Information Theory (ATIT)25-27.11.2020*

Long-term storage of electronic documents is essential for successful development in various fields of economy, science, and culture. While producing enormous amounts of data, modern society faces challenges related to creating systems for long-term data storage, as well as methods for securing these storages against unauthorised access. As the body of knowledge available to humanity continues to expand, and so do data recording technologies, the importance of developing long-term storage methods increases. We need to ensure long-term storage of genetic and medical and biological information, storing data from routine environmental monitoring, including data from hydro-meteorological monitoring for long periods, seismic tomography data, government records, scientific heritage data, namely published results of scientific research and experiments, bibliographic and factual databases, information about scientists, their scientific activities, publications, projects, etc., information related to complex engineered facilities, and information on cultural heritage of humanity. Several types of data require continuous storage for decades, like archival storage, and even for hundreds or thousands of years, when dealing with genetic data or data that can impact the survival of future generations [3]. Special media for data storage are an important element of systems for long-term storage of electronic documents. Therefore, development of such media represents a scientific and technological problem of high importance. Its urgency is due to the fact that no existing technical means can ensure long-term data storage.

Keywords: long-term data storage, data coding, sapphire disc, data migration, micro-etched structures, ANNs.

1. INTRODUCTION

When creating media for long-term data storage, two central questions emerge. The first of these concerns the material of storage media likely to last long enough to convey a message to generations thousands of years into the future. Special microfilms and optical media of different types with substrate made of special materials are developed for long-term storage of information. It should be noted that large-scale research is being carried out to create special optical media for long-term data storage based on the use of highly stable materials and recording methods, which support different methods of reading [1-3]. Faced with the lack of suitable options for storage device production, researchers around the world have re-embraced the use of chemically stable high-strength synthetic materials as adequately durable long-term storage media. The second crucial problem when creating long-term data storage media concerns the choice of the form for the presentation and coding of data to be recorded.

The purposes of this work are the following:

- Analysis of state-of-the-art methods of the technologies for creating media for long-term data storage.
- Substantiation of methods of representation and coding of information on long-term data storage media.
- Examination of the effectiveness of the proposed methods.
- In the next section, the state-of-the-art methods for creation of long-term storage media are analyzed in detail.

2. RELATED WORK

Current long-term data storage technologies are based on the data migration method, which implies routine data transfer to new storage devices [2]. Data migration needs to include not only migration of electronic documents themselves, but also of document metadata. The long-term storage format description should be augmented with a set of tags needed to store document metadata (e.g. Qualified Dublin Core) [4]. The process of data migration is considerably complicated and expensive, and can entail partial data loss or modification. Therefore storage devices with maximum possible migration intervals are preferable when creating archival storage systems [2]. Two technologies are currently proposed for the creation of

long-term data storage media: data storage on microfilm and on optical devices made of highly stable materials.

Piql service offers a high-resolution photosensitive film as a digital storage medium. Data is written to film as large QR-codes, each containing 8.8 million pixels. This allows any kind of data to be preserved off-line, on a storage medium with a documented lifetime of 500 years. Piql has developed all software and hardware needed to write and read back data on a special silver halide film. To ensure long-term preservation, these films should be stored at low temperatures in special repositories. Such repositories have been created in many countries, including the USA, Germany, and Norway.

The decoding software is open source and the data can be retrieved by using any digital camera and computer available in the future. Piql's preservation technology is not recommended for data that needs to be instantly accessible. It is rather a secure, migration-free and future-proof option for valuable data that needs to be preserved long-term [10-12, 15-20]. In March 2017, the Arctic World Archive was officially opened. The Arctic climate with permafrost is perfect for long-term storage of Piql's film [13]. On 8 July 2020, 21TB of data recorded on 186 reels of piqlFilm were stored in a vault hundreds of meters deep [14].

Conventional compact discs cannot ensure long-term data preservation, and therefore, to leverage the potential of optical recording methods, special data media are created using highly stable materials. In particular, it was proposed to use discs of sapphire, on which to micro-etch information [2, 3], WORM-type optical M-DISCs using single layer highly reflective film for recording [5], and archival discs with special plastic substrate and photosensitive layers based on palladium oxides [2]. They differ in the chosen substrate material, recording type, and characteristics of reflective layers. In particular, different types of metal storage devices are offered for long-term storage, made of wolfram [6], nickel, and gold. The Long Now's Rosetta disc, for example, is made of nickel. Nickel stampers used to replicate compact discs are utilised for long-term data storage [7].

Quartz and sapphire, high-temperature optical materials, are extensively considered as media for creating long-term storage devices. Arnano, a French technology start-up, has developed a disc of leucosapphire, on which to micro-etch information about the storage of nuclear waste. A long-term storage device technology using quartz glass has been announced [8].

The second crucial problem when creating long-term data storage media concerns the choice of the form for the presentation and coding of data to be

recorded. It is even more challenging than choosing materials for storage media. To estimate the service life of storage devices, accelerated tests can be used. However, these methods are not applicable when justifying the choice of presentation and coding methods for data subject to long-term storage. It is proposed to record information on long-term storage media by means of placing diminished graphic or textual images onto the medium, which can be read by optical systems using appropriate magnification. The advantage of this way of presentation is that subsequent retrieval of information doesn't require special reading devices or software. The optical resolution required to read the data is defined by the diminution used for recording. Such data presentation is used on several types of sapphire and metal discs [2]. Presenting data as microimages complicates their processing and lowers the processing speed. To ensure high durability of long-term storage of information, it is proposed to use non-binary codes working with digital data on a symbol level, e.g. with bytes of information. Non-binary codes are used in channels with grouped errors as components of cascade codes to ensure error control on various types of optical media (CD, DVD, Blu-ray, etc.) [9]. This coding method was chosen due to the fact that it had been widely and successfully used to produce billions of copies of compact discs of various types.

3. DEVELOPMENT OF OPTICAL RECORDING METHODS

Improvements in optical discs development area allowed to increase volume of the storage. However, mentioned technologies are approaching fundamental limits. In particular surface-storage optical recording technology is characterized with diffraction limit while two-dimensional data storage systems resolution depends on the laser beam spot size that is focused onto an optical disc surface. In order to increase media density one should decrease the spot size. Therefore volumetric optical recording has been developed to overcome the limit of density. Nowadays, there are two different methodologies for approaching three-dimensional optical data storage: one is hologram data storage and the other is three dimensional bit-wise structures which could be presented as upgrade of optical disc systems. Three dimensional bit-wise optical data storage offers the potential for high recording capacity because bit information can be stored at different layers within a certain volume of the recording media. The information is coded in

the form of micro-spots located inside of the substrate material. Thereby three-dimensional optical data storage using a nonlinear optical process are demonstrated to be most productive. Two-photon excitation is easily achieved by using strong femtosecond laser pulses and provides a means of activating chemical or physical processes with high spatial resolution in two or three dimensions. Thus, it can reduce the size of bits more effectively than one-photon excitation by changing refractive index of the substrate material regions.

Optical beam lithography (OBL) technique possesses the advantage to fabricate three-dimensional structures with relatively high spatial resolution. It should be noticed that resolution of conventional single-beam OBL is limited by the light wavelength of the recording system laser. The goal is development of three-dimensional diffraction-unlimited OBL technique with a two-beam strategy that overcomes this limit. In two-dimensional optical data storage system, where information is recorded only in one layer inside the medium, most of the volume of the optical disc is used only as a substrate. Obvious solution is including third axial dimension. However, the recording beam focused deep in the volume of the optical medium inevitably causes scattering losses. It should be mentioned that for shorter wavelength of optical recording system which is typical for modern high-resolution drives the losses became even bigger and thereby information signal cannot be delivered efficiently for multilayer recording. In addition, it is became a technologically complicated task to manufacture three-layer Blu-Ray format discs. This challenge has spurred the revolutionary idea of two-photon excitation by a femtosecond pulsed laser beam.

Three-dimensional optical data storage using a nonlinear optical process began to draw much attention after the formation of nanosized bits. Two-photon excitation is easily achieved by using strong femtosecond laser pulses and provides a means of activating chemical or physical processes with high spatial resolution in two or three dimensions. Thus, it can reduce the size of bits more effectively than one-photon excitation by changing refractive index of the substrate material. Due to its highly confined properties and high efficiency of penetration into the volume of a recording medium using laser beams, the information can be recorded in multiple layers of the recording medium. The two-photon excitation technique could be applied to a variety of materials for high-density memory media, including photopolymerizable materials, photochromic materials, photorefractive materials, photo-bleaching materials, void-fabricatable materials and nanoparticles dispersed

materials. The idea behind multi-dimensional optical data storage is to multiplex multiple states of information in the same three-dimensional spatial region of a recording medium. The information can be encoded into additional physical dimensions of the writing beam, such as spectra or polarization, and then individually addressed. The techniques of polarization and spectral encoding are the core of third-generation optical data storage.

The use of photoluminescent read data allows creating media containing big quantity of information layers. The main problem of creating a multi-layer optical media with photoluminescent reading is to provide high-speed data reproduction. To reduce crosstalk between adjacent layers it was proposed to modify code which represents data. In the photoluminescent storage the data is presented as local variations of the photoluminescent substance properties. The substance is illuminated with a radiation at excitation wavelength (readout process), and the photoluminescent signal is registered at a different wavelength. A simple spectral filter can separate the fluorescent signal at a receiver from the noise of the excitation radiation. The photoluminescent medium can provide a very high contrast ratio. Photoluminescent storage of data has a number of advantages which allows to solve typical problems of reflective, refractive and polarized optical storage systems and be efficiently used at development of the reliable, simple and cheap three-dimensional optical storage medium and optical drive, which in principle will be much simpler than the existing optical disc systems.

The photoluminescent multilayer disc structure includes substrate and sandwich-structure of information and intermediate layers. Thickness of the information layers depends on the on the information elements depth, while thickness of the intermediate layers depends on the recording system objective lens aperture and must be chosen big enough to divide photoluminescent signal from different layers. While all the structure of the disc is transparent and homogeneous the parasitic signal will be caused mostly by photoluminescence and absorption of pits areas where laser light is unfocused. For big quantity of layers the level noise will got significant value, so it was suggested to distinguish readout signal as a variable one. It's became possible because if thickness of intermediate layer is quite bigger then parasitic signal from closest layer will vary only in the fixed and determined range. Also it is proposed to record information only by the lands (distances between the pits) length, while pits should be as small as it possible to avoid undesirable absorption and thus changing of the noise level. Furthermore in information layer of photoluminescent multilayer disc structure there are

inner and outside peripheral areas which uphold a stable level of parasitic signal during readout from the edges of the disc. It was calculated that for 20 layers disc with information layer structure similar to HD-DVD disc format media (total information capacity stands 300 GB) it's possible to get signal-noise-ratio value of 8:1 or higher.

Thereby development of surface-storage volume improving technologies should include possibility of implementation of volumetric optical recording methods.

4. METHOD CONSTRUCTION

To produce long-term data storage devices, we propose optical devices with sapphire substrate and micro-etched data presentation. For long-term data preservation, we propose to use read-only storage devices (ROM devices). This device type provides for the highest durability and prevents the recorded data from being tampered. However, direct laser burning cannot be used in producing such storage devices due to the high melting point of sapphire substrate and its high chemical durability.

Special production equipment is required to record on sapphire substrate long-term storage optical discs, which is used to produce stampers for compact discs replication. Information is recorded onto a storage device using master-disc laser-burning station on a multilayer photoresist. Through a mask in the photoresist layer, the substrate is plasma etched to obtain micro-etched images of strictly controlled depth, which is $\lambda/4n$ (for sapphire substrates, which require 440 nm wavelength for data reading, the pinhole depth is 64 nm). Multilayer photoresists are necessary in order to prevent the sapphire substrate surface from charging when plasma etching the substrate. One of the photoresist layers must be electrically conductive, which would drain electrical charge during plasma etching.

Fig. 1 shows the surface of a sapphire data storage device and the cross-section of pinholes used to code the recorded information. The pinholes are obtained as a result of a multi-stage process, which includes laser burning on a multilayer photoresist, sequential selective chemical etching of multilayer photoresist layers, and substrate plasma etching through windows in the photoresist.

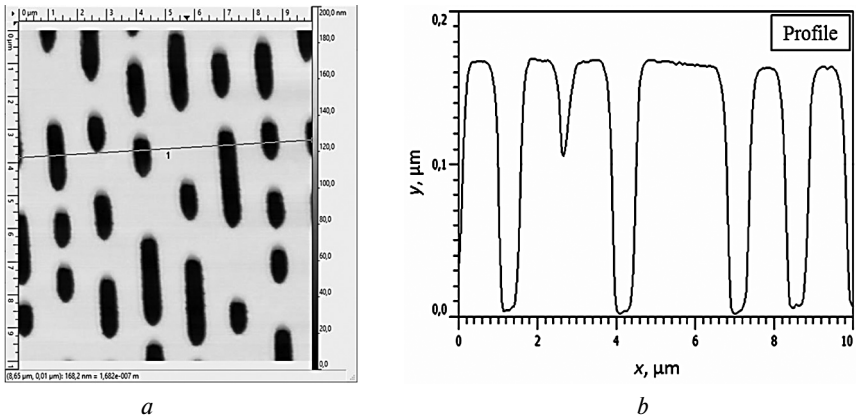


Fig. 1. Sapphire disc microrelief structure

To ensure high level readout signals, the surface of the sapphire substrate with a developed micro-etched structure is covered with a high-temperature metal reflective layer. We propose to use films of rhodium, chromium, or transition metal nitrides as reflective layers.

Micro-etched data presentation on the surface of a long-term storage device was chosen, because it enables data readout using different physical methods, and not only focused laser beam in special compact disc drives. The most accessible reading method appears to be reading using a conventional optical microscope with respective magnification, which requires no special equipment. When record density is increased, recognition of submicronic structures representing the recorded information can become challenging. Therefore, of special interest are reading methods using computer-aided neural network teaching to recognize spectra of reflected signals under multi-wavelength irradiation with femtosecond pulses.

These methods can be applied to recognize submicronic structures. Neural networks should be used for the recognition of visual images in order to overcome limitations caused by the high level of noise when retrieving information from ultra-dense optical records [11-13]. Such reading system can be used to retrieve information recorded as micro- and nanostructures on the surface of sapphire substrate optical storage devices. However, the primary method for retrieving the recorded information remains data reading with a focused laser beam, which scans the surface of a storage device.

5. CONCLUSIONS

1. In this paper, we propose the new complex method for producing long-term data storage devices based on the use of optical media with sapphire substrate and optical readout, presenting the data as micro-etched structures.

2. Data can be retrieved from optical storage devices containing records as submicronic etched structures with a scanning laser beam using conventional compact disc drives or dedicated devices.

3. As the data coding method, we propose to use non-binary codes working with digital data with grouped errors as components of cascade codes to ensure error control, which are used to produce compact discs.

6. REFERENCES

1. Petrov V.V., Z. Le, Kryuchyn A. A., Shanoylo S.M., M. Fu, Beliak Ie.V., Manko D.Yu., Lapchuk A.S., Morozov Ye.M. Long-term storage of digital information.— /National Academy of Sciences of Ukraine, Institute for Information Recording.— Kyiv: Akadempriodyka, 2018. — 148 p. — ISBN 978-966-360-360-5
2. Li, W., Yang, Y., & Yuan, D. (2015). Reliability assurance of big data in the cloud: Cost-effective replication-based storage. Waltham, MA: Morgan Kaufman is an imprint of Elsevier.
3. Viacheslav Petrov, Andriy Kryuchyn, and Ivan Gorbov «High-density optical discs for long-term information storage», Proc. SPIE 8011, 22nd Congress of the International Commission for Optics: Light for the Development of the World, 80112J (25 October 2011); <https://doi.org/10.1117/12.900745>
4. Schulz, G. (2017). Software-defined data infrastructure essentials cloud, converged, and virtual fundamental server storage I/O tradecraft. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group.
5. Y. Unutulmazsoy, R. Merkle, I. Rastegar, J. Maier, and J. Mannhart (2017). Research Update: Ionotronics for long-term data storage devices. Retrieved October 13, 2020, from <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4974480>.
6. De Vries, J., Schellenberg, D., Abelmann, L., Manz, A., & Elwenspoek, M. (2013, October 09). Towards Gigayear Storage Using a Silicon-Nitride/Tungsten Based Medium. Retrieved October 13, 2020, from <https://arxiv.org/abs/1310.2961>
7. Petrov V. V., Kryuchyn A. A., Shanoylo S. M., Kryuchyna L.I., Kossko I. O.: The MetalCarriers for Long-Term Storage of the Information: Exec.Ed. Dodonov O.G. (NAS of Ukraine, Institute for Information Recording, (Naukova dumka, Kiev, 2005) [in Ukrainian].

8. Kazansky, P., Cerkauskaite, A., Beresna, M., Drevinskas, R., Patel, A., Zhang, J., & Gecevicius, M. (2016). Eternal 5D data storage via ultrafast-laser writing in glass. *SPIE Newsroom*. doi:10.1117/2.1201603.006365.
9. Schmalen, L., Alvarado, A., & Rios-Muller, R. (2016). Predicting the Performance of Nonbinary Forward Error Correction in Optical Transmission Experiments. *Optical Fiber Communication Conference*. doi:10.1364/ofc.2016.m2a.2.
10. R. Bjerkestrand (2014). *Alternative Storage Technologies*. Retrieved October 13, 2020, from <https://www.piqi.com/wp-content/uploads/Alternative-Storage-Technologies-Piqi-Whitepaper-1.pdf>.
11. Wiecha, P.R., Lecestre, A., Mallet, N. et al. Pushing the limits of optical information storage using deep learning. *Nat. Nanotechnol.* 14, 237–244 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41565-018-0346-1>.
12. Miroshnichenko, A. Deep learning beats the optical diffraction limit. *Nat. Nanotechnol.* 14, 198–199 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41565-018-0357-y>
13. K. de Haan, Y. Rivenson, Y. Wu, A. Ozcan *Deep-Learning-Based Image Reconstruction and Enhancement in Optical Microscopy Proceedings of the IEEE* Vol. 108, No. 1, January 2020 P. 30–50.
14. Kraetke, M. (n.d.). From GitHub to GitHub with XProc: An approach to automate documentation for an open source project with XProc and the GitHub Web API. *Proceedings of Balisage: The Markup Conference 2016*. doi:10.4242/balisagevol17.kraetke01.
15. Min Gu, Xiangping Li and Yaoyu Cao. Optical storage arrays: a perspective for future big data storage. *Light: Science & Applications* 3, e177 (2014) doi:10.1038/lisa.2014.58.
16. Min Gu *Optical data storage with diffraction-unlimited resolution Lasers and Electro-Optics Europe (CLEO EUROPE/IQEC), 2013 Conference on and International Quantum Electronics Conference Munich 12–16 May 2013 Print ISBN 978-1-4799-0593-5* doi:10.1109/CLEOE-IQEC.2013.61801790
17. Gu M, Li X, Lan TH, Tien CH. Plasmonic keys for ultra-secure information encryption. *SPIE Newsroom*, 19 November 2012; doi:10.1117/2.1201211.004538.
18. A.A. Kudryavtsev, N.L. Moskalenko *Is there any future of optical discs? Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, V. 16, N 4. 2013. p. 362–365.
19. Zhang, T.D. Milster, J. Butz, W. Bletcher, K.J. Erwin, E. Walker, *Signal, Cross Talk and Signal to Noise Ratio in Bit-Wise Volumetric Optical Data Storage. Technical Digest of Joint International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage, IEEE Catalog, No. 02 EX552, pp. 246–248.*
20. Chon, J.W.M., Bullen, C., Zijlstra, P. & Gu, M. Spectral encoding on gold nanorods doped in a silica sol-gel matrix and its application to high density optical data storage. *Adv. Funct. Mater.* 17, 2007. p. 875–880.

**В. В. Петров, В. П. Семиноженко, В. М. Пузиков, О. Я. Данько,
А. А. Крючин, С. М. Шанойло, Л. В. Бутенко, І. О. Косско**

НОСІЙ ДЛЯ ДОВГОТЕРМІНОВОГО ЗБЕРІГАННЯ ІНФОРМАЦІЇ

Патент України № 73611. Опубл. 15.08.2005. Бюл. № 8.

Винахід належить до обчислювальної техніки та технології виготовлення цифрових носіїв інформації.

Для довготермінового зберігання інформації використовуються носії, запис інформації на які здійснюється у цифровому вигляді, що дає можливість періодично здійснювати перезапис інформації без втрати якості записаної інформації.

Відомий носій для довготермінового зберігання інформації, що складається з металевої підкладки з рельєфною мікроструктурою, яка кодує записану інформацію [1].

Недоліком цього носія-аналога є мала надійність зберігання інформації внаслідок поступового забруднення носія пилом, продуктами окиснення металу жировими плівками тощо. За такого варіанту носія інформації втрачається одна з головних переваг оптичних носіїв інформації щодо забезпечення високої захищеності записаної інформації від механічних пошкоджень за рахунок можливості відтворення записаної інформації сфокусованим лазерним променем через прозору підкладку.

Найбільш близьким за технічною суттю є носій для зберігання інформації у цифровому вигляді – компакт-диск, що складається з прозорі пластикової підкладки, на якій відштампована рельєфна мікроструктура, яка кодує записану інформацію, відбиваючого металевого шару і захисного непрозорого лакового шару [2].

Недоліком цього носія-прототипу є те, що строк зберігання компакт диска обмежений 2-50 роками внаслідок невисокої механічної міцності підкладки, деградації її оптичних характеристик та порушення оптичного контакту між підкладкою та відбиваючим шаром.

Носії з пластиковими підкладками не витримують підвищення температури більше $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, парів води та органічних розчинників. В основу винаходу покладено задачу підвищення надійності зберігання інформації та зручності експлуатації шляхом того, ідо в носії для довготермінового зберігання інформації, що складається з прозорої підкладки, на якій нанесено рельєфну мікроструктуру, яка кодує записану інформацію, відбиваючого шару та захисного шару, підкладку виконано з монокристалічного матеріалу, наприклад, лейкосапфіру з орієнтацією 0001 (с) завтовшки 0,5–1,4 мм, на якій селективним травленням створено рельєфну мікроструктуру. Висока надійність зберігання інформації на запропонованому носії досягається за рахунок високої термодинамічної стабільності підкладки ($T > 2000\text{ }^{\circ}\text{C}$, високої механічної міцності і твердості). Такі характеристики монокристалів Al_2O_3 дають змогу запобігти утворенню механічних пошкоджень носія інформації, гарантують збереження інформації за умов значного підвищення температури (під час пожежі). Можливість виготовлення таких носіїв інформації стала реальною за умови створення технологій вирощування великих оптично однорідних кристалів лейкосапфіру з орієнтацією 0001 (с) та обробки тонких (0,5–1,4) мм монокристалічних підкладок діаметром 100–130 мм.

Нанесення інформації на монокристалічну підкладку у вигляді заглиблень, розташованих по спіралі, виконується у такій послідовності;

- на монокристалічну підкладку наносять шар позитивного фоторезисту завтовшки 150–1200 нм;
- на станції лазерного запису здійснюють запис інформації на шарі фоторезисту:
- провадять селективне травлення фоторезисту та його термічну обробку;
- через вікна у фоторезисті виконують травлення підкладки прискореними іонами аргону, при цьому здійснюється і вилучення шару фоторезисту.

Товщина шару фоторезисту підбирається таким чином, що на момент завершення процесу травлення підкладки на задану глибину фоторезист повністю вилучається з підкладки. Необхідна глибина заглиблень становить для підкладок з лейкосапфіру 80–110 нм, при цьому забезпечується максимальна амплітуда сигналів відтворення інформації (глибина заглиблень повинна бути $1/4$, де λ – довжина хвилі зчитуючого випромінювання).

Можливим варіантом нанесення інформації на монокристалічну підкладку є хімічне травлення крізь металеву маску плавиковою кислотою за умови підвищеної температури (200–300 °С). Металева маска на поверхні монокристалічної підкладки створюється з використанням вище описаної послідовності технологічних операцій, до яких додано тільки одну – нанесення шару металу (срібла, нікелю тощо) на поверхню підкладки.

Для отримання необхідних значень сигналів відтворення виконується металізація тієї поверхні підкладки, на якій нанесено рельєфну мікроструктуру, що кодує записану інформацію. Металізація здійснюється з використанням корозійностійких металів з високими температурами плавлення, таких як родій, платина, хром, нікель тощо. При цьому використовуються методи нанесення тонких плівок, які забезпечують максимальну адгезію металевого відбиваючого шару до підкладки, такі як іоно-плазмові, магнетронні напилення тощо. При необхідності металеве покриття може бути хімічно витравлено, а потім вдруге нанесено. Така потреба може виникнути при необхідності реставрувати носій інформації, який зазнав пошкоджень металевого шару під дією температур або хімічних речовин.

Діапазон товщини монокристалічної підкладки визначається технологічністю її виготовлення (допуском на товщину), що визначає можливість фокусування лазерного випромінювання до визначених розмірів $\sim 0,8$ мкм з викривленням хвильового фронту не більше 1/10 (верхнє граничне значення – 1,4 мм) та механічною міцністю підкладки (нижнє граничне значення – 0,5 мм).

Перевагою монокристалічних прозорих підкладок для оптичних носіїв інформації є висока оптична однорідність.

Найбільша стабільність показників відбиваючого шару може бути досягнута за умови використання іонної імплантації металу (хрому, нікелю тощо) у поверхневий шар підкладки.

Для захисту рельєфної мікроструктури від механічних забруднень носій герметизують захисним шаром, який виготовляють з акрилового або янтарного лаку.

ЛІТЕРАТУРА

1. www.jioRSAM.com/hdrosetta.htm.
2. Оптические дисковые системы: Пер. с англ./ Г. Боухьюз, Дк. Брат, А. Хейсер и др. – М.: Радио и связь. 1991. – 280 с.

**В. В. Петров, В. П. Семиноженко, В. М. Пузиков, А. А. Крючин,
А. С. Лапчук, С. М. Шанойло, Л. В. Бутенко, Є. М. Морозов,
І. В. Горбов, Є. В. Беляк, Д. Ю. Манько**

СИСТЕМА ЗЧИТУВАННЯ ДАНИХ З ОПТИЧНОГО НОСІЯ

*Патент України № 104961 МПК⁷ G11B 7/00, G11B 7/24
25.03.2014. Бюл. № 6, 2014 р.*

Винахід належить до інформаційних технологій і може використовуватися в системах відтворення даних з цифрових носіїв довготермінового зберігання даних.

Відома система зчитування даних з оптичного носія, яка складається з лазера, світлоподільного кубика, фокуруючої лінзи, чвертьхвильової пластинки і фотоприймача. Фокууючою лінзою безперервне випромінювання лазера фокусується в пляму мікронних розмірів на поверхні носія, а відбитий від носія модульований відтвореною інформацією промінь спрямовується на фотоприймач, який формує сигнали зчитування і автофокусування [1]. Недоліком цього технічного рішення (аналога) є те, що така система зчитування не дозволяє формувати сигнали автотрекінгу і чутлива до двопроменезаломлення в підкладці оптичного носія, в зв'язку з чим до значень двопроменезаломлення в підкладках компакт-дисків висуваються жорсткі вимоги ($\Delta n = n_0 - n_e = 10^{-4}$).

В прототипі [2] частково недоліки пристрою аналога усунуто в системі зчитування даних з оптичного носія, яка складається з лазера, фокууючої лінзи, світлоподільного кубика, чвертьхвильової пластинки, багатоплощинкового фотоприймача і додатково містить дифракційну ґратку, встановлену безпосередньо після лазера. Наявність дифракційної ґратки та багатоплощинкового фотоприймача дозволяє формувати сигнали автотрекінгу. Недоліком прототипу є те, що система зчитування також чутлива до двопроменезаломлення.

Системи зчитування даних з оптичного носія [2] можуть використовуватися для відтворення даних, коли підкладка оптичного носія виготовлена з аморфного полімеру (наприклад, полікарбонату), тому що в даному матеріалі значення двопронезаломлення є нехтовно малим і практично не залежить від кута падіння зчитувального променя на оптичний носій. Відомо, що оптичні носії інформації на підкладках з аморфних полімерів не придатні для довготермінового зберігання інформації. Для довготермінового зберігання інформації використовуються підкладки з високостабільних монокристалічних матеріалів, більшість з яких має значне двопронезаломлення [3]. Але у випадку, коли підкладка оптичного носія виготовлена з високостабільного монокристалічного матеріалу, використання зазначених (аналога і прототипу) систем зчитування неможливе, тому що в монокристалічних матеріалах значення двопронезаломлення починає впливати на достовірність і надійність зчитування даних з оптичних носіїв.

Задачею винаходу є підвищення достовірності і надійності відтворення даних з оптичних носіїв з підкладками з високостабільних двопронезаломлюючих монокристалічних матеріалів, які забезпечують довготермінове зберігання даних.

При падінні лазерного випромінювання, промені якого утворюють сферичний хвильовий фронт, на монокристалічну підкладку виникають фазові спотворення світла з незвичайною поляризацією (р-поляризацією), які є суперпозицією астигматизму та сферичних абераций різних порядків. Зокрема фазові спотворення призводять до того, що S- і р-поляризоване світло буде фокусуватися на різній глибині і відстань між двома фокусами ΔF буде визначається наступним чином:

$$\Delta F = 2h\Delta n/n_0,$$

де Δn – різниця між показниками заломлення звичайного (n_0) і незвичайного (n_e) променя, h – товщина підкладки оптичного носія.

При фокусуванні крізь високостабільну монокристалічну підкладку товщиною 1 мм відстань між плямами в декілька разів перевищує розмір плями. Це не дає можливості надійно відтворювати записані дані.

Поставлена задача вирішується тим, що в відомій системі зчитування даних з оптичного носія, яка складається з лазера, фокуруючої лінзи, світлоподільного кубика, багатоплощадкового фотоприймача, чвертьхвильової пластинки і дифракційної ґратки, між фокууючою

лінзою та носієм інформації розміщено монокристалічну пластинку, яка має інверсне значення різниці показників заломлення звичайного і незвичайного променів до значення різниці показників заломлення звичайного і незвичайного променів матеріалу високостабільної монокристалічної, наприклад, сапфірової, підкладки оптичного носія. Оскільки в процесі роботи оптичний дисковий носій обертається навколо своєї осі, а компенсуюча пластинка є нерухомою, то реалізувати метод можна тільки при вертикальній орієнтації оптичної осі матеріалу оптичного диска і компенсуючої пластинки.

Головне технічне рішення полягає в тому, що ефект фокусування лазерного випромінювання з різними поляризаціями в плямах, які, за рахунок різних показників заломлення звичайного та незвичайного променів, рознесені по глибині фокусування, усувається за рахунок проходження лазерного променя крізь додаткову пластинку. Наприклад, для сапфіру, який є високостабільним монокристалічним матеріалом, з якого можуть бути виготовлені підкладки для носіїв довготермінового зберігання даних, маємо:

$$\Delta n_{spf} = n_0 - n_e = 1,78038 - 1,77206 = 0,00832 = 8 \cdot 10^{-3}.$$

Дослідження наявних прозорих одноосних високостабільних оптичних кристалів показали, що для випадку матеріалу підкладки із сапфіру найкращим матеріалом для компенсації аберацій є кварц, що має наступні значення показників заломлення $n_0=1,5443$, $n_e=1,5534$, різниця між якими становить:

$$\Delta n_{kvr} = 1,5443 - 1,5534 = -9 \cdot 10^{-3},$$

тобто має інверсне значення показників заломлення звичайного та незвичайного променів до значень показників заломлення звичайного та незвичайного променів сапфірової підкладки. Умова компенсації астигматичної аберації записується як

$$\frac{H_{spf}}{n_{spf}^2} \Delta n_{spf} + \frac{H_{kvr}}{n_{kvr}^2} \Delta n_{kvr} = 0,$$

де H_{spf} і H_{kvr} – товщини високостабільної монокристалічної підкладки з сапфіру та компенсуючої кварцевої пластинки відповідно.

Вищі порядки аберацій будуть повністю компенсовані, коли матеріал підкладки оптичного диска і компенсуючої пластинки мають одна-

кові показники заломлення для звичайного променя. В іншому випадку компенсація буде частковою. Тому, для отримання дифракційно обмеженої оптичної системи, компенсуюча пластинка повинна мати показник заломлення близький до показника заломлення підкладки оптичного диска. Відповідно, другою головною умовою щодо вибору матеріалу, з якого повинна виготовлятися компенсуюча пластинка системи зчитування з оптичного носія, є те, щоб значення показника заломлення матеріалу компенсуючої пластинки n_{com} було близьке до значення показника заломлення підкладки оптичного носія n_{sub} .

Умови для отримання оптичної системи з мінімальними залишковими аберациями для оптичного диска з високостабільною монокристалічною підкладкою із сапфіру та монокристалічної кварцової компенсуючої пластинки можна записати у вигляді:

- 1) $H_{kvr} / H_{spf} = 0.62 \div 0.72$,
- 2) $H_{kvr} + H_{spf} = H_{sum} \pm 5\%$,
- 3) $|n_{com} - n_{sub}| < 0.3$,

де перша умова – це умова компенсації астигматизму, друга умова пов'язана зі сферичною аберациєю плоскопаралельного шару, третя умова – умова достатньої компенсації абераций вищого порядку, H_{sum} – сумарна товщина сапфірової підкладки і кварцової компенсуючої пластинки.

Співвідношення товщини кварцової компенсуючої пластинки H_{kvr} і товщини сапфірової підкладки H_{spf} повинно мати значення з діапазону $0,62 \div 0,72$. У випадку, коли значення співвідношення H_{kvr}/H_{spf} виходить за рамки цього діапазону, буде спостерігатися значне спотворення сфокусованого променя.

Товщину підкладки бажано вибирати із діапазону $0,6 \div 2$ мм, межі якого було вибрано з міркувань того, що при товщині підкладки оптичного носія меншої за $0,6$ мм, конструкція буде мати низьку механічну міцність і виготовлення якої являє значну технологічну проблему. Для конструкції з товщиною підкладки більшої ніж 2 мм різко зростають масогабаритні показники оптичної системи і вона стає чутливою до нахилу поверхні диска відносно її осі.

У табл. наведено приклади конструкційних параметрів (товщини) диска з сапфіровою підкладкою і кварцової компенсуючої пластинки для оптичних дисків різних форматів. Товщина кварцової компенсуючої пластинки залежить від товщини сапфірової підкладки, чим і треба керуватись при виготовленні кварцової компенсуючої пластинки.

Таблиця. Товщини сапфірової підкладки і кварцової компенсуючої пластинки для оптичних дисків різних форматів

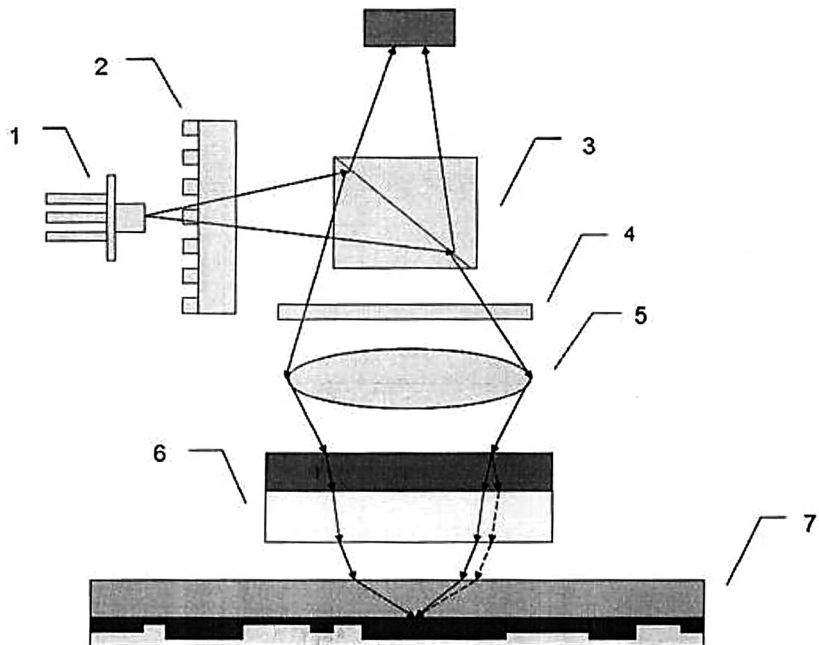
| Тип носія | Товщина сапфірової підкладки (мм) | Товщина кварцової пластини (мм) | Нескомпенсована аберация $\Delta\Phi/\Phi_0$, 100 % |
|---|-----------------------------------|---------------------------------|--|
| CD | 0,714 | 0,486 | 1 |
| DVD | 0,357 | 0,243 | 1,6 |
| CD (з відтворенням на довжині хвилі $\lambda = 400$ nm) | 0,714 | 0,486 | 0,3 |

Для зчитування даних з CD, з товщиною сапфірової підкладки 0,714 мм, треба використовувати компенсуючу кварцову пластинку товщиною 0,486 мм, а для зчитування даних з DVD, з товщиною сапфірової підкладки 0,357 мм, треба використовувати компенсуючу кварцову пластинку товщиною 0,243 мм.

Для оптичних носіїв із сапфіровими підкладками, запис на які зроблено в різних форматах (CD, DVD тощо), товщина кварцової пластинки становить 0,2–0,6 мм.

На кресленні представлена оптична схема системи зчитування даних з оптичного носія. В процесі відтворення даних лазерне випромінювання, яке генерується лазерним світлодіодом (1), крізь дифракційну ґратку (2), чвертьхвильову пластинку (5) і світлоподільний кубик (3) направляється на фокусуєчу лінзу (6). Фокусуєча лінза (6) фокусує лазерне випромінювання крізь компенсуючу пластинку (7) і підкладку носія (8) на рельєфну структуру носія інформації. Наявність монокристалічної компенсуючої пластинки призводить до того, що звичайний та незвичайний промені фокусуються по глибині фокусування в одну площину.

На кресленні показано розповсюдження звичайного (суцільна лінія) та незвичайного (штрихова лінія) променя при проходженні крізь монокристалічну компенсуючу пластинку з кварцу та високостабільну монокристалічну підкладку оптичного носія з сапфіру. Відхилення в розповсюдженні незвичайного променя крізь підкладку оптичного носія компенсується його відхиленням в протилежному напрямку при проходженні крізь компенсуючу пластинку, що дає змогу зменшити вплив двопроменезаломлення в підкладках оптичних носіїв до мінімуму.



Як матеріал підкладки оптичних носіїв для довготермінового зберігання даних можуть використовуватися сапфір або кварц. У випадку, коли як матеріал для виготовлення підкладки оптичних носіїв застосовується сапфір (Al_2O_3), для виготовлення компенсуючої пластинки використовують кварц (SiO_2), і навпаки, коли як матеріал для виготовлення підкладки оптичних носіїв застосовується кварц (SiO_2), то для виготовлення компенсуючої пластинки використовують сапфір (Al_2O_3).

ДЖЕРЕЛА ІНФОРМАЦІЇ

1. The compact disk handbook, 2nd ed./ Ken C. Pohlmann. - Madison, Wisconsin. A-R Editions, Inc., 1992. - p. 349.
2. United States Patent G 11 B 7/135. Inventors: Kim, Kim, Lee, Park, Song (Lg Electronics Inc., KR). Assignee: Lg Electronics Inc. (KR) Published: April 18, 2001.
3. В.В. Петров, В.П. Семиноженко, В.М. Пузиков, О.Я. Данько, А.А. Крючин, С.М. Шанойло, Л.В. Бутенко, І.О. Косско, Носій для довготермінового зберігання інформації (Пат, 73611 Україна. - Опубл. 15.08.2005. Бюл. № 8).

ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

1. Система зчитування даних з оптичного носія, який має підкладку з високостабільного монокристалічного матеріалу, яка складається з лазера, фокусууючої лінзи, світлоподільного кубика, багатоплощадкового фотоприймача, дифракційної ґратки, чвертьхвильової пластинки, яка **відрізняється** тим, що між фокусууючою лінзою та оптичним носієм розміщено компенсуючу монокристалічну пластинку, яка має інверсне значення різниці показників заломлення звичайного і незвичайного променів відносно до значення різниці показників заломлення звичайного і незвичайного променів високостабільного монокристалічного матеріалу підкладки оптичного носія.

2. Система зчитування даних з оптичного носія за п. 1, яка **відрізняється** тим, що компенсуючу монокристалічну пластинку виготовлено з монокристалічного кварцу, товщина якої складає 62 %–72 % від товщини монокристалічної сапфірової підкладки.

**В. В. Петров, В. П. Семиноженко, В. М. Пузиків, А. А. Крючин,
А. С. Лапчук, С. М. Шанойло, Л. В. Бутенко, Є. М. Морозов,
І. В. Горбов, Є. В. Беляк, Д. Ю. Манько**

СИСТЕМА ЗЧИТУВАННЯ ДАНИХ З ОПТИЧНОГО НОСІЯ ТА ОПТИЧНИЙ НОСІЙ ДЛЯ ДОВГОТЕРМІНОВОГО ЗБЕРІГАННЯ ДАНИХ

*Патент України №106699. МПК⁷ G11B 7/00, G11B 7/24
10.06.2014. Бюл. №11, 2014 р.*

Винахід належить до інформаційних технологій і може використовуватися в системах зберігання і відтворення даних з цифрових носіїв довготермінового зберігання даних.

Відома система зчитування даних з оптичного носія, яка складається з лазера, світлоподільного кубика, фокуруючої лінзи, чвертьхвильової пластинки і фотоприймача. Фокууючою лінзою безперервне випромінювання лазера фокусується в пляму мікронних розмірів на поверхні носія, а відбитий від носія модульований відтвореною інформацією промінь спрямовується на фотоприймач, який формує сигнали зчитування і автофокусування [1]. Недоліком цього технічного рішення (аналога) є те, що така система зчитування не дозволяє формувати сигнали автотрекінгу і чутлива до двоприменезаломлення в підкладці оптичного носія, в зв'язку з чим до значень двоприменезаломлення в підкладках компакт-дисків висувуються жорсткі вимоги ($\Delta n = n_0 - n_e = 10^{-4}$).

В прототипі [2] частково недоліки пристрою аналога усунуто в системі зчитування даних з оптичного носія, яка складається з лазера, фокууючої лінзи, світлоподільного кубика, чвертьхвильової пластинки, багатоплощинкового фотоприймача і додатково містить дифракційну ґратку, встановлену безпосередньо після лазера. Наявність дифракційної ґратки та багатоплощинкового фотоприймача дозволяє формувати

сигнали автотрекінгу. Недоліком прототипу є те, що система зчитування також чутлива до двопроменезаломлення.

Системи зчитування даних з оптичного носія [2] можуть використовуватися для відтворення даних, коли підкладка оптичного носія виготовлена з аморфного полімеру (наприклад, полікарбонату), тому що в даному матеріалі значення двопроменезаломлення є нехтовно малим і практично не залежить від кута падіння зчитувального променя на оптичний носій. Відомо, що оптичні носії інформації на підкладках з аморфних полімерів не придатні для довготермінового зберігання інформації. Для довготермінового зберігання інформації використовуються підкладки з високостабільних монокристалічних матеріалів, більшість з яких має значне двопроменезаломлення [3]. Але у випадку, коли підкладка оптичного носія виготовлена з високостабільного монокристалічного матеріалу, використання зазначених (аналогу і прототипу) систем зчитування неможливе, тому що в монокристалічних матеріалах значення двопроменезаломлення починає впливати на достовірність і надійність зчитування даних з оптичних носіїв.

Задачею винаходу є підвищення достовірності і надійності відтворення даних з оптичних носіїв з підкладками з високостабільних двопроменезаломлюючих монокристалічних матеріалів, які забезпечують довготермінове зберігання даних.

При падінні лазерного випромінювання, промені якого утворюють сферичний хвильовий фронт, на монокристалічну підкладку виникають фазові спотворення світла з незвичайною поляризацією (р-поляризацією), які є суперпозицією астигматизму та сферичних абераций різних порядків. Зокрема фазові спотворення призводять до того, що S- і р-поляризоване світло буде фокусуватися на різній глибині і відстань між двома фокусами ΔF буде визначається наступним чином:

$$\Delta F = 2h\Delta n/n_0,$$

де Δn – різниця між показниками заломлення звичайного (n_0) і незвичайного (n_e) променя, h – товщина підкладки оптичного носія.

При фокусуванні крізь високостабільну монокристалічну підкладку товщиною 1 мм відстань між плямами в декілька разів перевищує розмір плями. Це не дає можливості надійно відтворювати записані дані.

Поставлена задача досягається тим, що в відомій системі зчитування даних з оптичного носія, яка складається з лазера, фокуруючої лін-

зи, світлоподільного кубика, багатоплощадкового фотоприймача, чвертьхвильової пластинки і дифракційної ґратки, між фокусувальною лінзою та носієм інформації розміщено монокристалічну пластинку, яка має інверсне значення різниці показників заломлення звичайного і незвичайного променів до значення різниці показників заломлення звичайного і незвичайного променів матеріалу високостабільної монокристалічної, наприклад, сапфірової, підкладки оптичного носія. Оскільки в процесі роботи оптичний дисковий носій обертається навколо своєї осі, а компенсуюча пластинка є нерухомою, то реалізувати метод можна тільки при вертикальній орієнтації оптичної осі матеріалу оптичного диску і компенсуючої пластинки.

Головне технічне рішення полягає в тому, що ефект фокусування лазерного випромінювання з різними поляризаціями в плямах, які, за рахунок різних показників заломлення звичайного та незвичайного променів, рознесені по глибині фокусування, усувається за рахунок проходження лазерного променя крізь додаткову пластинку. Наприклад, для сапфіру, який є високостабільним монокристалічним матеріалом, з якого можуть бути виготовлені підкладки для носіїв довготермінового зберігання даних, маємо:

$$\Delta n_{spf} = n_o - n_e = 1,78038 - 1,77206 = 0,00832 = 8 \cdot 10^{-3}.$$

Дослідження наявних прозорих одноосних високостабільних оптичних кристалів показали, що для випадку матеріалу підкладки із сапфіру найкращим матеріалом для компенсації аберацій є кварц, що має наступні значення показників заломлення $n_o=1,5443$, $n_e=1,5534$, різниця між якими становить:

$$\Delta n_{kvr} = 1,5443 - 1,5534 = -9 \cdot 10^{-3},$$

тобто має інверсне значення показників заломлення звичайного та незвичайного променів до значень показників заломлення звичайного та незвичайного променів сапфірової підкладки. Умова компенсації астигматичної аберації записується як

$$\frac{H_{spf}}{n_{spf}^2} \Delta n_{spf} + \frac{H_{kvr}}{n_{kvr}^2} \Delta n_{kvr} = 0,$$

де H_{spf} і H_{kvr} – товщини високостабільної монокристалічної підкладки з сапфіру та компенсуючої кварцевої пластинки відповідно.

Вищі порядки аберацій будуть повністю компенсовані, коли матеріал підкладки оптичного диску і компенсуючої пластинки мають однакові показники заломлення для звичайного променя. В іншому випадку компенсація буде частковою. Тому, для отримання дифракційно обмеженої оптичної системи, компенсуюча пластинка повинна мати показник заломлення близький до показника заломлення підкладки оптичного диску. Відповідно, другою головною умовою щодо вибору матеріалу, з якого повинен виготовлятися компенсуюча пластинка системи зчитування з оптичного носія, є те, щоб значення показника заломлення матеріалу компенсуючої пластинки n_{kvr} було близьке до значення показника заломлення підкладки оптичного носія n_{spf} .

Умови для отримання оптичної системи з мінімальними залишковими аберациями для оптичного диска з високостабільною монокристалічною підкладкою із сапфіру та монокристалічної кварцової компенсуючої пластинки можна записати у вигляді:

- 1) $H_{kvr} / H_{spf} = 0.62 \div 0.72$,
- 2) $H_{kvr} + H_{spf} = H_{sum} \pm 5 \%$,
- 3) $|n_{com} - n_{sub}| < 0.3$,

де перша умова – це умова компенсації астигматизму, друга умова пов'язана зі сферичною аберацією плоскопаралельного шару, третя умова – умова достатньої компенсації аберацій вищого порядку, H_{sum} – сумарна товщина сапфірової підкладки і кварцової компенсуючої пластинки.

Співвідношення товщини кварцової компенсуючої пластинки H_{kvr} і товщини сапфірової підкладки H_{spf} повинно мати значення з діапазону $0,62 \div 0,72$. У випадку, коли значення співвідношення H_{kvr} / H_{spf} виходить за рамки цього діапазону, буде спостерігатися значне спотворення сфокусованого променя.

Товщину підкладки бажано вибирати із діапазону $0,6 \div 2$ мм, межі якого було вибрано з міркувань того, що при товщині підкладки оптичного носія меншої за $0,6$ мм, конструкція буде мати низьку механічну міцність і виготовлення якої являє значну технологічну проблему. Для конструкції з товщиною підкладки більшої ніж 2 мм різко зростають масогабаритні показники оптичної системи і вона стає чутливою до нахилу поверхні диска відносно її осі.

У табл. наведено приклади конструкційних параметрів (товщини) диска з сапфіровою підкладкою і кварцової компенсуючої пластинки для оптичних дисків різних форматів. Товщина кварцової компенсую-

чої пластинки залежить від товщини сапфірової підкладки, чим і треба керуватись при виготовленні кварцової компенсуючої пластинки.

Таблиця. Товщини сапфірової підкладки і кварцової компенсуючої пластинки для оптичних дисків різних форматів

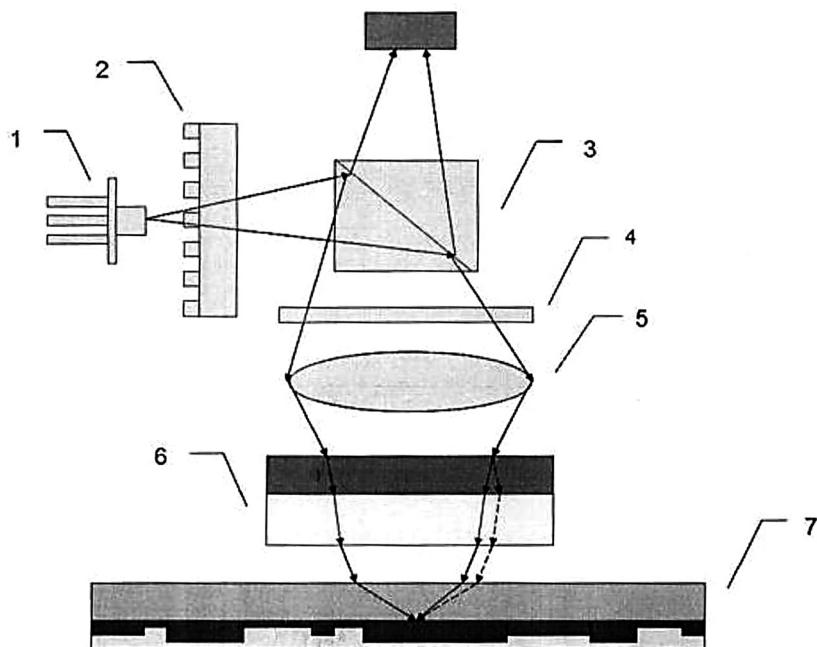
| Тип носія | Товщина сапфірової підкладки (мм) | Товщина кварцової пластини (мм) | Нескомпенсована аберация $\Delta\Phi/\Phi_0$, 100 % |
|--|-----------------------------------|---------------------------------|--|
| CD | 0,714 | 0,486 | 1 |
| DVD | 0,357 | 0,243 | 1,6 |
| CD (з відтворенням на довжині хвилі $\lambda = 400 \text{ nm}$) | 0,714 | 0,486 | 0,3 |

Для зчитування даних з CD, з товщиною сапфірової підкладки 0,714 мм, треба використовувати компенсуючу кварцову пластинку товщиною 0,486 мм, а для зчитування даних з DVD, з товщиною сапфірової підкладки 0,357 мм, треба використовувати компенсуючу кварцову пластинку товщиною 0,243 мм.

Для оптичних носіїв із сапфіровими підкладками, запис на які зроблено в різних форматах (CD, DVD тощо), товщина кварцової пластинки становить 0,2-0,6 мм.

На фіг. 1 представлена оптична схема системи зчитування даних з оптичного носія. В процесі відтворення даних лазерне випромінювання, яке генерується лазерним світло діодом (1), крізь дифракційну ґратку (2), чвертьхвильову пластинку (4) і світлоподільний кубик (3) направляється на фокусуючу лінзу (5). Фокусуюча лінза (5) фокусує лазерне випромінювання крізь компенсуючу пластинку (6) і підкладку носія (7) на рельєфну структуру носія інформації. Наявність монокристалічної компенсуючої пластинки призводить до того, що звичайний та незвичайний промені фокусуються по глибині фокусування в одну площину.

На фіг. 1 показано розповсюдження звичайного (суцільна лінія) та незвичайного (штрихова лінія) променя при проходженні крізь монокристалічну компенсуючу пластинку з кварцу та високо стабільну монокристалічну підкладку оптичного носія з сапфіру. Відхилення в розповсюдженні незвичайного променя крізь підкладку оптичного носія



Фіг. 1

компенсується його відхиленням в протилежному напрямку при проходженні крізь компенсуючу пластинку, що дає змогу зменшити вплив двоприменезаломлення в підкладках оптичних носіїв до мінімуму.

В якості матеріалу підкладки оптичних носіїв для довготермінового зберігання даних можуть використовуватися сапфір або кварц. У випадку, коли в якості матеріалу для виготовлення підкладки оптичних носіїв застосовується сапфір (Al_2O_3), для виготовлення компенсуючої пластинки використовують кварц (SiO_2), і навпаки, коли в якості матеріалу для виготовлення підкладки оптичних носіїв застосовується кварц (SiO_2), то для виготовлення компенсуючої пластинки використовують сапфір (Al_2O_3).

Відомий оптичний носій для довготермінового зберігання даних складається з підкладки, на яку нанесено рельєфну мікроструктуру,

яка кодує записану інформацію, відбиваючого та захисного шарів [3]. Мінімальне значення двоприменезаломлення спостерігається для сапфірових підкладок з орієнтацією 0001(c) (кристалографічна ось перпендикулярна площині підкладки) і вони можуть бути скомпенсовані компенсуючими пластинками, виготовленими з матеріалів з протилежним значенням двоприменезаломлення. Складність компенсації двоприменезаломлення кристалічної підкладки полягає в тому, що в процесі використання носій обертається навколо осі, перпендикулярній його площині. Навіть використання компенсуючої пластинки не дає повної компенсації двоприменезаломлення при відхилі кристалографічної осі сапфірової підкладки від визначеної орієнтації. При обертанні такої підкладки компенсація двоприменезаломлення має місце тільки при повному куті повороту підкладки.

Задачу підвищення щільності запису інформації на оптичний носій вирішується шляхом того, що в носії для довготермінового зберігання інформації, який містить підкладку з монокристалічного матеріалу з рельєфною мікроструктурою для кодування записаної інформації, відбиваючий та захисний шар, відповідно до винаходу, відхилення кристалографічної осі підкладки від перпендикуляра до площини оптичного носія не перевищує 20 кутових хвилин, при цьому товщина підкладки становить у межах 1,19...1,21 мм. Переважно підкладку виконують з сапфіру.

Фактично відхилення кристалографічної осі підкладки визначає максимальну щільність запису, яка може бути досягнута на оптичному носії з підкладкою з сапфіру. Різниця в оптичному шляху для звичайного і незвичайного променів може бути скомпенсована тільки при перпендикулярному положенні кристалографічної осі до поверхні носія.

Відхилення кристалографічної осі від перпендикуляра призводить до відповідного зміщення кристалографічної осі підкладки під час обертання носія, що в свою чергу призводить до астигматичної аберації. Тому промені з різною поляризацією фокусуються по-різному, тобто спостерігається розфокусування променів, яке не було враховано при розрахунку компенсуючої пластинки. Для стандарту CD величина розфокусування, обумовлене анізотропією підкладки носія, не повинно перевищувати 100 нм.

Винахідниками з метою вирішення завдання підвищення щільності запису на оптичний носій довготермінового зберігання даних, який

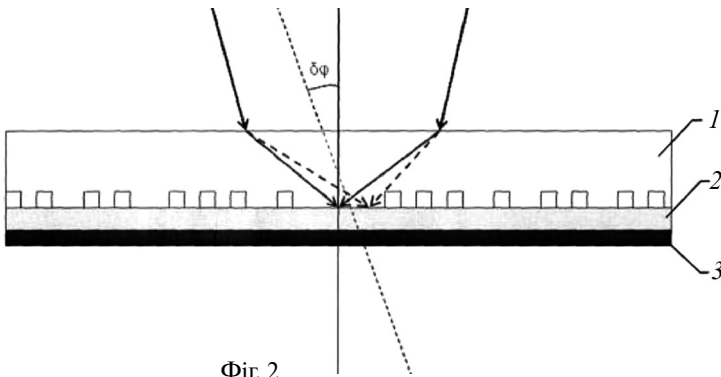
містить монокристалічну, наприклад, сапфірову підкладку, відбиваючий та захисний шари, виявлено, що поставлене завдання вирішується забезпеченням відхилення кристалографічної осі 0001(с) від перпендикуляра до площини оптичного носія у певному інтервалі. При цьому заявником також було визначено вимоги до оптимального інтервалу товщини підкладки, виходячи з технології її виготовлення та подальшого використання, який у сукупності з умовами для кута відхилення кристалографічної осі підкладки від перпендикуляра до площини оптичного носія призводить до утримання величини розфокусування у зазначених вище межах, необхідних для стандарту CD. Так, було встановлено, що підкладки з товщиною менше 1,19 мм мають недостатню механічну міцність і не можуть бути використані для виготовлення оптичних носіїв довготермінового зберігання даних. В оптичних носіях, товщина підкладки яких перевищує 1,21 мм, виникають аберації більш великих порядків, які роблять неможливим компенсацію двопрорезаломлення, виникаючого в підкладці оптичного носія, за допомогою компенсуючої пластинки.

Для цього винахідниками було отримано наступну залежність для оцінки максимального значення відхилення кристалографічної осі $\delta\varphi$, при якому розфокусування не перевищує заданого стандартом CD значення:

$$\delta\varphi = \frac{n \cdot \Delta F}{h \cdot \Delta n} \leq 0,3^\circ,$$

де n – показник заломлення сапфіру, ΔF – величина розфокусування променів для формату CD, h – товщина сапфірової підкладки з урахуванням кварцової компенсуючої пластинки, Δn – різниця оптичного шляху між звичайним і незвичайним променями. Тобто відхилення кристалографічної осі сапфірової підкладки від перпендикуляра до площини підкладки не повинна перевищувати 20 кутових хвилин.

Структура оптичного носія для довготермінового зберігання даних, який складається з сапфірової підкладки 1, на яку нанесену рельєфну мікроструктуру, відбиваючого шару 2 і захисного шару 3, наведено на фіг. 2. На фіг. 2 суцільною тонкою лінією зображена кристалографічна вісь підкладки при нормальному положенні, а штриховою тонкою лінією – відхилена кристалографічна вісь від нормального положення на кут $\delta\varphi$. Суцільною жирною лінією зображено розповсюдження променя при нормальному положенні кристалографічної осі сапфірової



Фіг. 2

підкладки, а штриховою жирною лінією – розповсюдження променя при відхиленні кристалографічної осі на кут $\delta\varphi$. На фіг. 2 можна спостерігати зміщення фокус від нормального положення.

Проведені дослідження показали, що при забезпеченні кута відхилення (до 20°) кристалографічної осі матеріалу підкладки та товщини підкладки у межах 1,19...1,21 мм можливе підвищення щільності запису інформації на оптичний носій та дотримання вимог щільності запису, з якою здійснюється реєстрація даних на компакт-дисках типу CD-ROM. При цьому можливе додаткове використання компенсуючої пластинки з протилежним значенням різниці між показниками заломлення між звичайним і надзвичайним променями для отримання безабераційного зображення пітів сапфірової підкладки.

ДЖЕРЕЛА ІНФОРМАЦІЇ:

1. The compact disk handbook, 2nd ed./ Ken C. Pohlmann. - Madison, Wisconsin. A-R Editions, Inc., 1992. - p.349.
2. United States Patent G 11 B 7/135. Inventors: Kim, Kim, Lee, Park, Song (Lg Electronics Inc., KR). Assignee: Lg Electronics Inc. (KR) Published: April 18, 2001.
3. Пат. 73611 Україна, G 11 B 7/00, 7/24. В.В. Петров, В.П. Семиноженко, В.М. Пузіков, О.Я. Данько, А.А. Крючин, С.М. Шанойло, Л.В. Бутенко, І.О. Косско. Носій для довготермінового зберігання інформації. Заявл. 25.04.2003. Опубл. 15.08.2005. Бюл. № 8.

ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

1. Оптичний носій для довготермінового зберігання даних, який містить підкладку з 5 монокристалічного матеріалу з рельєфною мікроструктурою для кодування записаної

інформації, відбиваючий та захисний шар, який відрізняється тим, що підкладка виконана таким чином, що відхилення її кристалографічної осі від перпендикуляра до площини оптичного носія не перевищує 20 кутових хвилин, при цьому товщина підкладки становить 1,19...1,21 мм.

2. Оптичний носій за п. 1, який відрізняється тим, що підкладку виконано з сапфіру.

3. Система зчитування даних з оптичного носія за п. 1, яка складається з лазера, фокуруючої лінзи, світлоподільного кубика, багатоплощадкового фотоприймача, дифракційної ґратки, чвертьхвильової пластинки, яка відрізняється тим, що між фокууючою лінзою та оптичним носієм розміщено монокристалічну пластинку, яка виконана таким чином, що має інверсне значення різниці показників заломлення звичайного і незвичайного променів по відношенню до 15 значення різниці показників заломлення звичайного і незвичайного променів високостабільного монокристалічного матеріалу підкладки оптичного носія.

4. Система зчитування даних з оптичного носія за п. 3, яка відрізняється тим, що компенсуючу монокристалічну пластинку виготовлено з монокристалічного кварцу, товщина якої складає 62 % + 72 % від товщини монокристалічної сапфірової підкладки.

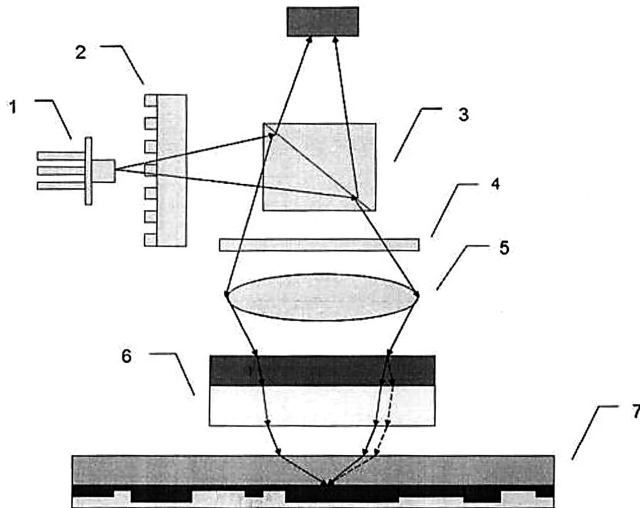
**V. V. Petrov, V. P. Semynozhenko, V. M. Puzikov, A. A. Kryuchyn,
A. S. Lapchuk, S. M. Shanoilo, L. V. Butenko, Ye. M. Morozov,
I. V. Gorbov, I. V. Beliak, D. Yu. Manko**

DATA READOUT SYSTEM FROM OPTICAL MEDIA

*WO 2014/116194 A4. G11B 7/1365 (2012.01); PCT/UA2014/000016.
priority date: a2013 01017 28.01.2013; publication date: 31.07.2014.*

Abstract: The invention relates to information technology and can be used in systems of archival data storage. The proposed system relates to readable data system which gets the information from the optical disk WORM- type (one-time recording and rereading) where the substrate is made of a highly-stable mono-crystalline material. Given system of archival data storage consists of a laser, focusing lens, beam splitting cube many surface photo-detector sensor, a diffraction grating and the quarter-wave plate. The system is distinguished from others in that that between the focusing lens and carrier information is available a mono-crystalline plate, which has a inverse value of the difference of the refractive indices of the ordinary and extraordinary rays to the value of the difference of the refractive indices of the ordinary and extraordinary rays for substrate of optical disk. For a highly stable optical disc substrate material for long-term storage and compensating plate for reading out optical systems is proposed to use sapphire or quartz.

1. System for reading out data from optical media (8), having a substrate made of highly mono-crystalline material, the system consists of a laser (1), focusing lens (6), beam splitting cube (3), many surface photodetector sensor (4), a diffraction grating (2), the quarter-wave plate (5), wherein between the focusing lens (6) and the optical media (8) is available a mono-crystalline compensating plate (7) that has inverse value of the difference of the



refractive indices of the ordinary and extraordinary rays relative to the value of the difference of the refractive indices of the ordinary and extraordinary rays for a highly monocrystalline substrate material optical media (8), at that the compensating plate (7) has a thickness within 62...72% of the thickness of the optical media substrate.

2. System for reading out data from optical media of claim 1, wherein the compensating plate (7) made of sapphire or quartz.

Statement under Article 19(1)

This invention is focused on compensation of constant high birefringence when the optical disc for long-term data storage has highly stable monocrystalline substrate (e.g. sapphire or quartz), characterized by a value ($\sim 10^{-3}$) of birefringence.

According to CN 101199010 B [D 1] and JP 2004 245957 A [D3] the optical disc substrate is made of a polymeric material which has a low birefringence ($\sim 10^{-4}$). Therefore the applied compensation element can compensate only low birefringence, which arise not only because of inhomogeneities of the substrate as well as because of to the stresses in the substrate caused by the rotation of the optical disc at high speeds.

According to US 6 487 160 B1 [D2] and US 2001/021162 A1 [D4] the

compensating element designed as a liquid crystal cell, which allows one to modify the characteristics of the compensator according to the magnitude and direction of the applied external electromagnetic field, and also depending on the position of the optical head in various zones of the disc. The compensating element has a large loss due to absorption in the control semi-transparent electrodes and optical losses in the liquid crystal.

The inventors founds that there was a need to use the mono-crystalline (e.g. quartz) compensating plate optically assembled with substrate of made of sapphire. The compensating quartz plate must have certain thickness H_{kvr} , which must be correlated with sapphire substrate H_{spf} thickness, namely relationship of H_{kvr}/H_{spf} must have within 0,62...0,72. In the case of deviation out from this range significant aberration of focused light beam may arise.

Therefore said relationship of H_{kvr}/H_{spf} included into the claim 1 according to the Art. 19 PCT.

[D1-D5] do not contain any information about high value birefringence compensation as well as about kind of material and thickness of substrate of optical disk and can be used only for optical discs with polymer substrates.

Thus, the amendments make it possible to claim that the claimed invention has an inventive step according to article 33(3) PCT.

At that, the amendments fix certain defects and observations, indicated in Item VII and Item VIII:

- the claim 1 is in the two-part form in accordance with the Rule 6.3 (b) PCT,
- the features of the claim 1 and claim 2 are provided with reference sign,
- the claim 1 contain the substrate as a part of the optical media to clarify the invention. At that, according to the PCT guidelines, section 5.37, identification of parameters of the first product (system) is possible via parameters of second product (optical media), which is not a part of the first product in the case of these products are connected by its use, the term “inverse value” should be interpreted so that the compensating plate should have a value of difference in the refractive indexes of the ordinary and extraordinary beams of approximately equal value of difference in the refractive indices of the substrate optical media in absolute value, but have the opposite $\text{Sign}(\Delta n_{com} \sim -\Delta n_{sub})$

Наукове видання

Національна академія наук України
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ РЕЄСТРАЦІЇ ІНФОРМАЦІЇ

САПФІРОВІ ДИСКИ ДЛЯ ДОВГОСТРОКОВОГО ЗБЕРІГАННЯ ДАНИХ

Збірник наукових праць

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України
252113 Київ, вул. М. Шпака, 2
Тел.: (044) 454 21 51

Підп. до друку .
Формат 60×84/16. Папір офс. Гарнітура Таймс.
Офс. друк. Ум. друк. арк. 8,83.
Наклад прим. Зам. №

Видруковано в ТОВ «Про формат»
Реєстраційне свідоцтво ДК № 5942 від 11 січня 2018 р.
02166, м. Київ, вул. Маршала Жукова, 45-Б, кв. 16

ISBN 978-966-02 9504-9