

УДК 004.85

И. В. Масол

ЗАО «Компания Росток»

Бульвар И. Лепсе, 4, 03180 Киев, Украина

Становление и перспективы развития производства компакт-дисков в Украине

Приведен анализ технологий изготовления подложек компакт-дисков. Представлены результаты анализа влияния параметров инжекционного литья поликарбоната на качество подложек компакт-дисков. Определены основные параметры процесса инжекционного литья, позволяющие получать компакт-диски высокого качества.

Ключевые слова: компакт-диски, инжекционное литье, двулучепреломление, полярископия.

Введение

В Украине производство компакт-дисков начало разворачиваться в середине 90-х годов прошлого столетия. Активное участие в этом процессе принимали компании, входящие в состав АК «Росток». Организация выпуска нового вида продукции требовала выбора таких технологических решений, которые обеспечивали бы как изготовление компакт-дисков высокого качества и возможности перехода к выпуску новых типов компакт-дисков, так и производства конкурентоспособной, доступной по цене для жителей Украины, продукции. Выпуск отечественных компакт-дисков был начат с освоения технологии инжекционного литья подложек компакт-дисков и адаптации ее к существующим условиям производства изделий из полимерных материалов.

При изготовлении подложек необходимо решить две взаимосвязанных проблемы: с одной стороны, обеспечить малое время изготовления подложек, а с другой — гарантировать их высокое оптическое качество. Одна из основных проблем в производстве компакт-дисков связана с необходимостью обеспечения минимальных значений двулучепреломления в подложках компакт-дисков. Двулучепреломление подложек характеризует напряжения и неоднородности, возникающие в подложках в процессе инжекционного литья. Высокие значения двулучепреломления приводят к тому, что информация, записанная на диске, не может быть корректно считана. Для подложек CD величина двулучепреломления не

© И. В. Масол

должна превышать 160 нм, для подложек DVD — 100 нм, а для Blu-Ray — 30 нм [1, 2].

Двулучепреломление сформованного диска должно быть сведено к минимуму для высококачественных дисков, и его можно контролировать, не допуская создания напряжений в диске при его формовании. Двулучепреломление представляет собой меру оптического запаздывания вследствие малых неоднородностей в составе диска, приводящих к появлению небольших, но существенных различий в показателе преломления. Небольшие неоднородности часто являются следствием ориентации полимера, которая возникает в результате литьевого формования. Двулучепреломление приводит к уменьшению интенсивности сигнала считывания и, как следствие, к увеличению количества ошибок при считывании кодированных данных. Показатели двулучепреломления, отличающиеся от нуля на величину, превышающую 200 нм, неприемлемы.

Двулучепреломление представляет собой проблему для поликарбонатных дисков вследствие того, что высокий коэффициент оптической чувствительности по напряжениям и низкая текучесть поликарбоната затрудняют формование дисков с низкими показателями двулучепреломления [3, 4]. Детальное исследование процесса инъекционного литья компакт-дисков позволило установить основные причины возникновения двулучепреломления. Первым источником являются индуцированные потоком полимера напряжения сдвига и нормального напряжения, возникающие в процессе заполнения полости и ведущие к ориентации молекулярных цепей, что приводит к возникновению двулучепреломления. Вторым источником двойного лучепреломления является неравномерное изменение плотности полимера и усадка его при неравновесном быстром охлаждении до температуры стеклования [5].

Предпринимались неоднократные попытки использовать другие полимерные материалы в качестве подложек компакт-дисков, в частности, акриловые полимеры, подложки из которых имеют по сравнению с поликарбонатными существенно меньшие значения двулучепреломления [3]. Низкий коэффициент оптической чувствительности по напряжениям и высокая текучесть акриловых полимеров в общем случае дают в результате значительно меньшее двулучепреломление, однако, по совокупности свойств подложки из поликарбоната превосходят подложки, изготовленные из других материалов. В частности, диски, изготовленные из акриловых полимеров, характеризуются меньшей механической прочностью по сравнению с дисками из поликарбоната, они склонны разрушаться и подвержены короблению [3]. Предлагалось много способов уменьшения двулучепреломления в подложках оптических дисков, в том числе предлагалось заполнять жидким органическим материалом дискообразную форму, которая вращалась при отверждении вокруг центральной оси со скоростью от 100 до 1700 об/мин. При вращении дискообразной формы с жидким органическим материалом в процессе отверждения материала происходит компенсация усадки отверждаемого органического материала под действием центробежных сил, что обеспечивает получение подложки с заданными характеристиками [6]. Такой способ не может обеспечить высокой производительности, и в технологии производства компакт-дисков используется постоянно совершенствующийся метод инъекционного литья с особо

точно программируемыми и регулируемые значениями давления, скорости впрыска и температуры.

В связи с использованием в канале записи/воспроизведения информации на компакт-диски поляризационных элементов, двулучепреломление в подложках сильно влияет как на процесс считывания, так и на процесс записи. Добиться нулевого значения двулучепреломления по всей поверхности подложки компакт-диска при малых временах (единицы секунд) формования подложек практически невозможно. Для уменьшения влияния двулучепреломления на процесс воспроизведения информации технологические режимы процесса инъекционного литья должны выбираться таким образом, чтобы нулевое значение двулучепреломления достигалось в центре рабочей зоны компакт-диска.

Типичное распределение двулучепреломления вдоль радиуса подложки компакт-диска представлено на рис. 1 [7].

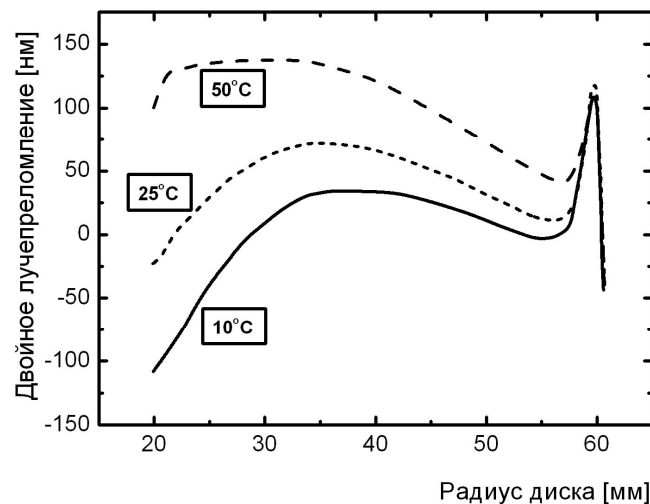


Рис. 1. Распределение значения двулучепреломления вдоль радиуса подложки компакт-диска

Разработчики и производители машин инъекционного литья приложили огромные усилия для уменьшения времени технологического цикла изготовления подложек компакт-дисков. В первых литьевых машинах время цикла изготовления подложки составляло десятки секунд (см. таблицу), а в современных машинах инъекционного составляет около 2-х секунд. Уменьшение времени изготовления подложек компакт-дисков достигнуто за счет точного задания и контроля температур, специальных инжекторов и т.д. [8].

Эволюция процесса инъекционного литья компакт-дисков [6]

CD	1983	27 сек.	Компрессионная инъекция, контроль температуры формы
CD	1983	< 19 сек.	Прямая инъекция
CD	1984	< 16 сек.	Применение холодного выпускного желоба
CD	1985	14 сек.	Применение медно-бериллиевого материала для изготовления выталкивателя

Продолжение таблицы

CD	1986	< 8 сек.	Новая технология литника без применения пуансона
CD	1989	< 6,0 сек.	Новая система отсоединения с более коротким ходом крышки формы
CD	1991	< 5,5 сек.	Оптимизированный канал охлаждения
CD	1992	< 4,3 сек.	Новая технологичная форма со встроенной системой отсоединения
CD	1994	< 3,8 сек.	Закрытая форма
DVD	1996	< 3,5 сек.	Закрытая форма
DVD	1998	< 3,3 сек.	Инжекционная компрессия вертикального литникового канала
DVD	2000	< 3,2 сек.	Новые технологии литья и отсоединения пресс-формы
DVD	2004	< 2,5 сек.	Динамическое регулирование температуры

Исследование процесса инжекционного литья оптических деталей, какими, несомненно, являются подложки оптических дисков, представляет значительный интерес для технологии изготовления дифракционных оптических элементов, интегральной оптики, светодиодов. Технология изготовления метаматериалов также базируется во многом на процессах инжекционного литья.

Анализ влияния двулучепреломления на процесс считывания информации с компакт-дисков

В большинстве устройств воспроизведения информации с компакт-дисков применяется оптическая система фокусировки лазерного излучения представленная на рис. 2. Излучение лазера через коллимирующие линзы, светоделитель и фокусирующий объектив направляется на поверхность компакт-диска. Отраженный от поверхности компакт-диска луч направляется на многоплощадочный приемник, с которого снимаются сигналы воспроизведения и слежения за фокусом и информационными дорожками (дифракционная решетка применяется в некоторых типах рекордеров).

Для исключения попадания отраженного от поверхности компакт-диска лазерного излучения в лазер, что при определенных условиях может приводить к кратковременному срыву генерации лазера считывания, используется поляризационный светоделитель и дополнительная четвертьволновая пластинка (преобразующая линейно поляризованное лазерное излучение в излучение с круговой поляризацией). Отраженное от диска излучение, пройдя через четвертьволновую пластину, снова превращается в линейно поляризованный свет, но с поляризацией, ортогональной к начальной поляризации. Вследствие этого на поляризационном делителе происходит защита лазера от отраженного от диска света. При двойном прохождении лазерного излучения через подложку компакт-диска за счет двулучепреломления в подложке происходит поворот плоскости поляризации отраженного излучения, что приводит к попаданию части отраженного света на лазер.

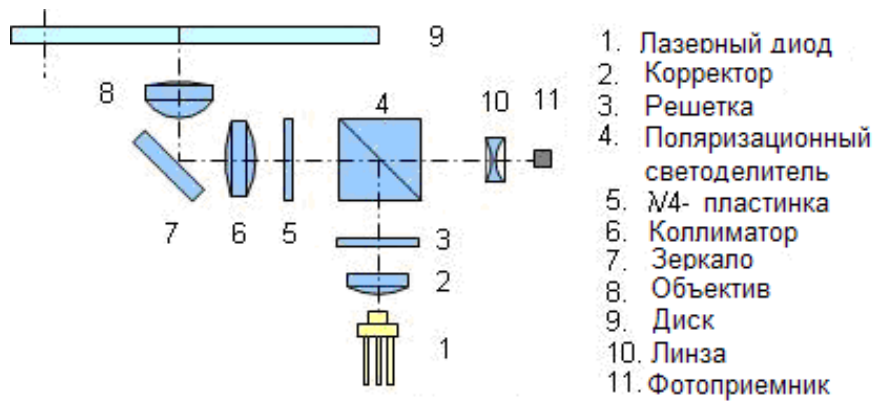


Рис. 2. Обобщенная оптическая схема устройства воспроизведения информации с компакт-дисков

Основным эффектом двулучепреломления в подложке компакт-дисков является возникновение поляризационно обусловленной астигматической aberrации и, как следствие, фокусирование света с различной поляризацией в разных плоскостях. Поляризационная природа оптических искажений, когда величина aberrации зависит от поляризации падающего света, делает невозможным применение стандартной теории aberrаций. В этом случае при использовании света с разной поляризацией и при разной ориентации оси кристалла оптические параметры системы будут существенно отличаться [9, 10]. Поэтому даже для низкоапертурных оптических систем при моделировании нужно применять строгую электродинамическую модель системы. В первом приближении падающий свет можно записать следующим образом:

$$\vec{E}_1 = A \vec{e}_1 \exp\left(i \vec{k} \left(\vec{r} - \vec{r}_1 \right)\right), \quad (1)$$

$$\vec{E}_2 = A \vec{e}_2 \exp\left(i \vec{k} \left(\vec{r} - \vec{r}_2 \right)\right), \quad (2)$$

где \vec{r}_1 и \vec{r}_2 — два вектора, указывающие на две разные точки, лежащие на различном удалении на оптической оси системы, как показано на рис. 3.

Точный анализ, с учетом особенностей прохождения пучка света через объектив и двулучепреломляющую пластину, приводит к выражениям для поля в области фокуса объектива, которые представляют собой интегралы от тензорных функций Грина оптической системы (включая оптический диск с aberrационными членами) [9]:

$$E_\alpha \left(\vec{r}_2 \right) = \sum_\beta \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G_{\alpha\beta} \left(\vec{r}_2, \vec{r}_1 \right) E_\beta \left(\vec{r}_1 \right) d^2 \vec{r}_1, \quad (3)$$

$$H_{\alpha}(\vec{r}_2) = \sum_{\beta} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Gamma_{\alpha\beta}(\vec{r}_2, \vec{r}_1) E_{\beta}(\vec{r}_2) d^2 \vec{r}_1. \quad (4)$$

В выражениях (3), (4) интегралы берутся по поверхности передней принципиальной плоскости объектива. Трудность моделирования заключается в сложности нахождения тензорных функций Грина для абберационного объектива. При малых значениях анизотропности оптического диска эффект анизотропии проявляется в некоторой неточности фокусировки и слежения за дорожкой [9].

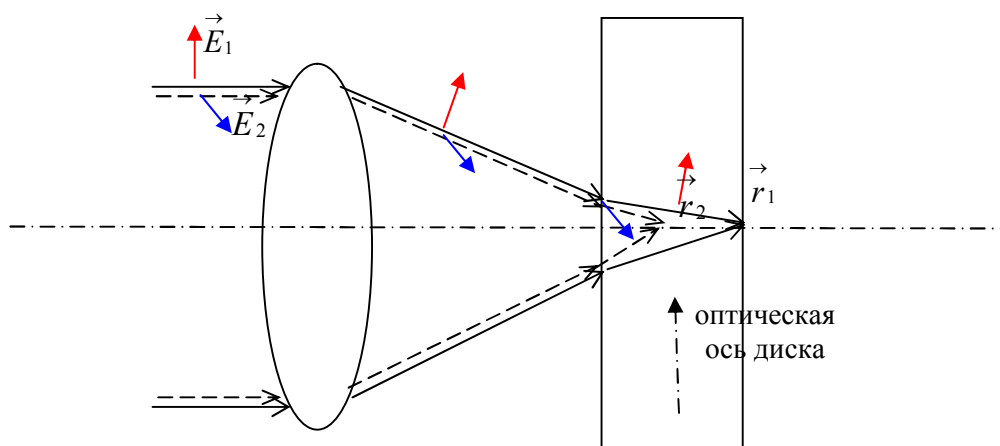


Рис. 3. Фокусирование пучка света через диск с двулучепреломлением

Из-за сложности задачи и вследствие применения оптических дисков с малой анизотропией задача искажения для случая дисков с большой анизотропией исследована мало. Вместе с тем, как говорилось выше, двулучепреломление приводит к невозможности точного фокусирования пучка света на регистрирующем слое. Вследствие этого, в первом приближении, эффект двулучепреломления будет такой же, как при дефокусировании объектива. Эффект дефокусировки оптического пучка, вследствие важности задачи для оптической записи, изучен полно и всесторонне [11]. Дефокусировка приводит к увеличению светового пятна на диске, и, как следствие, к увеличению перекрестных помех и уменьшению полезного сигнала (рис. 4, 5). Из-за аналогичности влияния на свойства сфокусированного пятна дефокусировки и асферической абберации, сильная оптическая анизотропия диска будет так же влиять на параметры сигнала, как и сильная расфокусировка. Понижение полезного сигнала и повышение паразитного сигнала в случае большой оптической анизотропии оптического диска приводит к уменьшению амплитуды сигнала и росту количества ошибок при считывании (рис. 5). Поэтому поддержание оптической анизотропии оптического диска ниже необходимого уровня является очень важной технологической задачей.

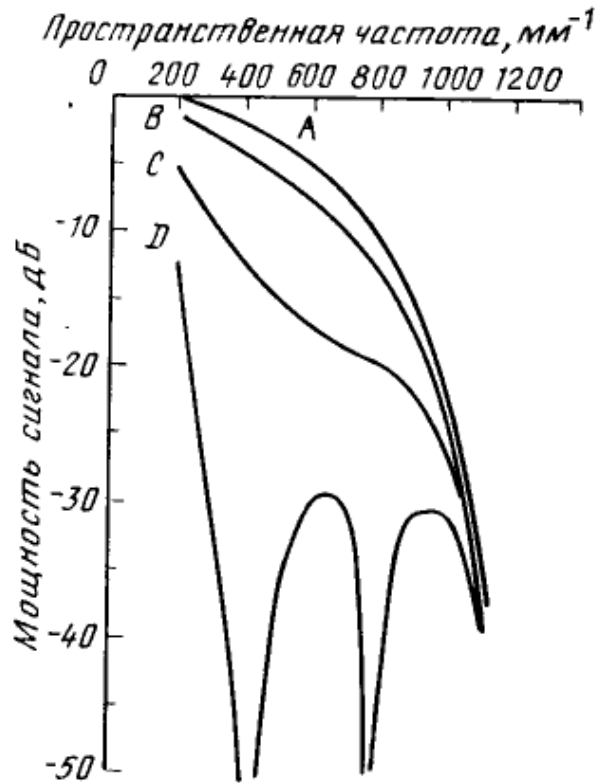


Рис. 4. Частотная характеристика (пространственные частоты) считанного сигнала при различной расфокусировке оптической системы [11]: кривая А — для $W_{20} = 0$, среднее квадратическое отклонение оптической длины пути (ОДП) $\Delta = 0,0\lambda$; В — для $W_{20} = 0,25$, $\Delta = 0,07\lambda$; С — $W_{20} = 0,5$, $\Delta = 0,14\lambda$; D — $W_{20} = 0,75$, $\Delta = 0,21\lambda$

Для анализа качества подложек компакт-дисков было разработано специальное устройство для оперативного контроля литья подложек. Устройство контроля качества отражательной способности компакт-дисков позволяет проводить исследования по измерению уровня отраженного сигнала, который присутствует в оптической головке в режиме воспроизведения. Схема управления сигналами в оптической головке спроектирована так, чтобы была разомкнута система автоматического регулирования усиления усилителей воспроизведения сигналов с 4-х площадок фотоприемника. Это позволяет в относительных единицах измерять уровень сигнала, отраженного от подложки компакт-диска по всей поверхности.

Таким образом, с помощью данного устройства и методики измерений можно проводить исследования по выявлению эффекта двулучепреломления, который возникает при нарушении технологического процесса штамповки дисков. Было установлено, что наиболее значительное уменьшение величины сигналов воспроизведения проявляется в краевых зонах компакт-дисков, что, в частности, может быть связано с отклонением температуры нагрева поликарбоната и скоростей нагрева и охлаждения от оптимальных. Проведенные эксперименты показали, что уменьшение уровня сигналов более чем на 50 % приводило к резкому возрастанию числа ошибок. Такое уменьшение сигналов наблюдалось в сравнительно узких кольцевых зонах около краев диска. Анализ подложек на полярископе, на ко-

торых наблюдались существенные изменения сигналов, показал значительные поляризационные искажения в этих областях (поляризационные исследования проводились на неметаллизированных подложках).

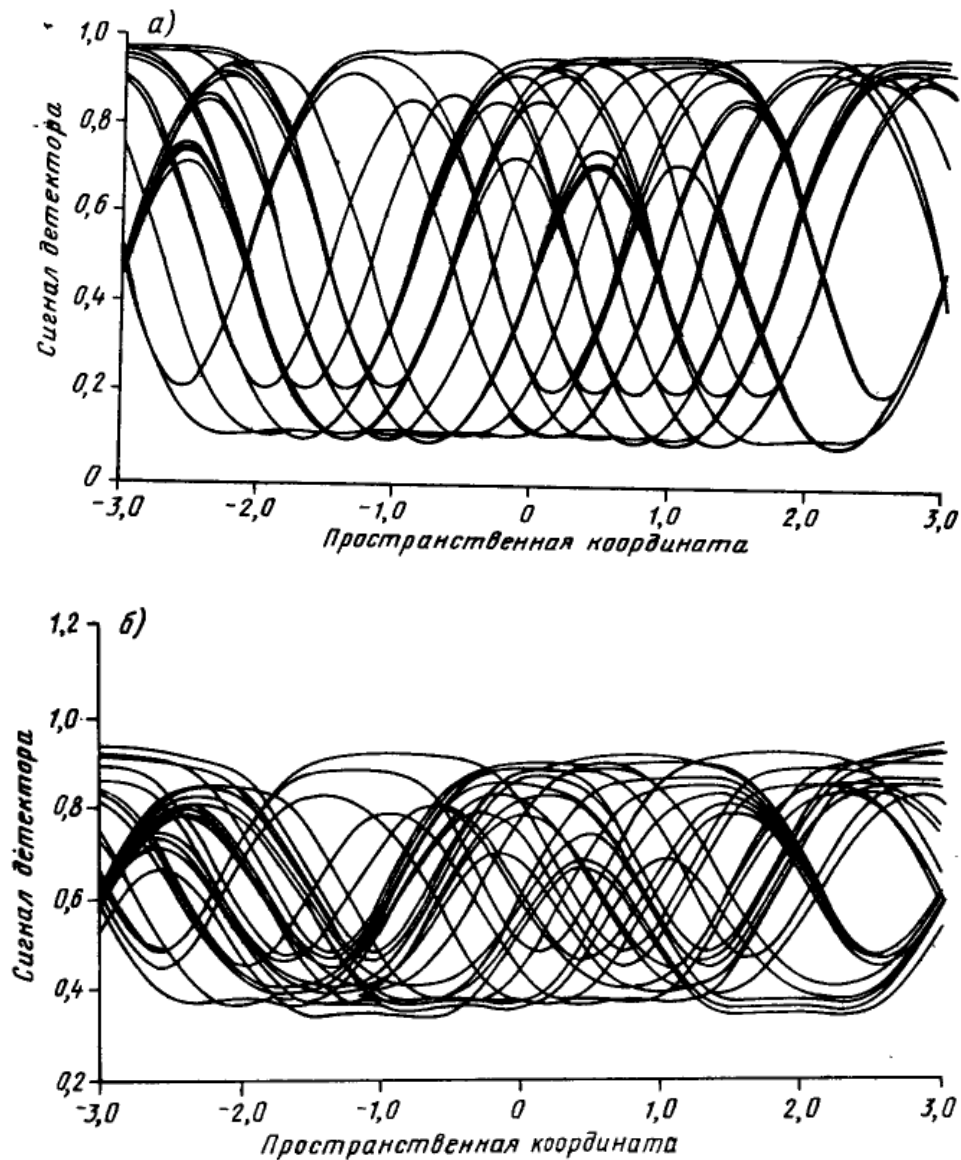


Рис. 5. Рассчитанные глазковые диаграммы [11], которые получаются при наложении сигналов детектора от нескольких различных последовательностей пит на диске: а) для идеальной оптической системы; б) в случае сильно расфокусированного сканирующего луча

Рекомендации по выбору режимов изготовления подложек компакт-дисков

Изготовление компакт-дисков всех типов, особенно дисков новых поколений с минимальным количеством ошибок, предполагает осуществление контроля

на всех этапах технологического процесса производства носителей информации. Проведение такого контроля требует как использования специального стендового оборудования (для контроля качества матриц, проведения поляризационных измерений подложек и т.д.), так и точного поддержания режимов изготовления компакт-дисков. В процессе изготовления подложек должна тщательно контролироваться чистота исходного полимера для формования вследствие того, что примеси могут оказать отрицательное влияние на считывание кодированных данных. Полимер для формования должен в достаточной мере обладать текучестью для того, чтобы надлежащим образом заполнить форму, а также способностью точно воспроизведения размеров и глубин дорожек. Полимер для формования, который точно не воспроизводит глубин и размеров, будет давать увеличенное количество ошибок при считывании кодированных данных [3]. Для выбора оптимальных режимов инжекционного литья подложек компакт-дисков нами широко использовались поляризационные измерения подложек, начиная от простейших полярископов до специализированных стендов, которые позволяли получать количественные значения двулучепреломления в различных зонах подложек компакт-дисков.

Выводы

1. Поляризационные характеристики подложек компакт-дисков оказывают существенное влияние на процесс записи/воспроизведения информации с компакт-дисков.

2. Уменьшение времени литья подложек компакт-дисков приводит к увеличению двулучепреломления в подложках даже при незначительных отклонениях от заданных режимов литья.

3. Использование поляризационных методов исследования подложек компакт-дисков позволяет оптимизировать режимы инжекционного литья (распределение температур, скорость потоков полимера и т.д.) подложек компакт-дисков, сохранив при этом малые циклы литья.

1. *Оптические диски. История, состояние, перспективы развития* / [Петров В.В., Крючин А.А., Шанойло С.М. и др.]. — К.: Наукова думка, 2004. — 174 с.

2. *Надцильний оптичний запис інформації* / [Петров В.В., Крючин А.А., Шанойло С.М. и др.]: відп. ред. О.Г. Додонов. — К.: Ін-т проблем реєстрації інформації НАН України, 2009. — 282 с. — ISBN978-966-02-5027-7.

3. *Пат. 2191695* Российской Федерации, МКИ В 29D 17/00, G11B 3/70, G11 В 7/26. Способ изготовления носителя для записи информации / Чолод Майк Стефан (USA), Хоун Дольд Ричард (USA), Стоун Дэвид Генри (USA). — № 200010 1006/12; заявл. 15.06.1998; опубл. 27.10.2002. — 10 с.

4. *Поляриметрия подложек компакт-дисков* / [С.Н. Савенков, А.А. Крючин, Е.А. Оберемок, В.В. Якубчак] // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2005. — Т. 7, № 4. — С. 3–12.

5. *Goang-Ding Shyu. Numerical Simulation of Flow-Induced Birefringence in Injection Molded Disk* / Goang-Ding Shyu, Avraam I. Isayev, Ho-Sang Lee // Korea — Australia Rheology J. — 2003. — Vol. 15, N 12. — P. 159–166.

6. *Пат. 2068200*. Российской Федерации МПК G11В 7/26. Способ изготовления подложек оптического информационного носителя / Велюбтин Л.П., Холявка А.А. — № 5047432/28; заявл. 21.05.1992; опубл. 20.10.1996.

7. *Oerley H.* Birefringence: Can Red Laser Equipment Measure Blue Discs? / H. Oerley, T. Yamamoto // *One to One*. — 2005. — N 7. — P. 48.

8. *Cole G.* Speed and Quality: the Conflicting Demands on Moulding Equipment / G. Cole // *One to One*. — 2006. — N 9. — P. 37–41.

9. *Stallinga S.* Axial Birefringence in High-Numerical Aperture Optical Systems and the Light Distribution Close to Focus / S. Stallinga // *J. Opt. Soc. Am. A*. — 2001. — Vol. 16, N 11. — P. 2846–2859.

10. *Bernacki B.E.* Investigation of Substrate Birefringence Effects on Optical-Disk Performance / B.E. Bernacki, M. Mansuripur // *Appl. Opt.* — 1993. — Vol. 32, N 32. — P. 6547–6555.

11. *Оптические дисковые системы* / [Боухьюз Г., Браат Дж., Хейсер А. и др.]. — М.: Радио и связь, 1991. — 279 с.

Поступила в редакцию 17.01.2012