

САМОДЕЛЬНЫЙ СПЕКТРОСКОП ИЗ DVD: ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ КОНСТРУКЦИИ

Жужа Михаил Александрович, физик, преподаватель
Жужа Мария Михайловна, физик, инженер оптической связи

Предисловие

Данная статья создана на основе переработанной и существенно дополненной конкурсной работы на второй этап конкурса «Я исследую мир» (1 января – 28 февраля 2014 г.) третьего конкурса РА ТРИЗ «С ТРИЗ по жизни». Работа на конкурсе получила диплом 1 степени, поэтому её можно рассматривать как один из примеров выполнения и оформления конкурсных работ по техническому (инженерному) направлению в ТРИЗ. При поиске технических решений авторы применяли различные инструменты ТРИЗ – ресурсы, приёмы, законы, ..., однако ввиду большого объёма материала в статье не приведено детальное обоснование выбора того или иного инструмента ТРИЗ, а также нет пошагового решения изобретательских задач.

В статье сохранен рекомендуемый организаторами конкурса РА ТРИЗ план оформления конкурсной работы (аннотация, цель, ..., выводы).

Аннотация

Совершенствовались самодельные спектрометры, изготовленные с использованием дифракционных решеток на основе DVD. Такие спектрометры полезны для школьников при изучении оптики, а также они позволяют в магазине электротоваров выбрать для освещения квартиры электрические лампы с благоприятным для глаз спектром.

Цель работы

Создать простой, дешевый, компактный и удобный в эксплуатации спектрометр для учебных исследовательских целей, а также бытового применения, в частности, для приобретения электроламп с благоприятным для глаз спектром излучения.

Способы достижения цели

1. Проведение предварительных теоретических и экспериментальных исследований.
2. Рассмотрение известной конструкции самодельного спектрометра и его функциональных возможностей.
3. Выявление недостатков конструкции и её совершенствование с помощью инструментария ТРИЗ.
4. Изготовление новой конструкции спектрометра.
5. Смотри пункт 3.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Введение

Большинство информации из окружающей среды человек получает по зрительному каналу. Для исследования мира недостаточно органов чувств человека. Оптические приборы позволяют исследовать мир «вооруженным взглядом». Одним из приборов такого «вооружения» является **спектроскоп** – оптический прибор для визуального наблюдения спектра излучения. Для получения спектра в спектроскопах используются призмы или дифракционные решетки (дифракционные решетки бывают отражательными и прозрачными).

Дифракционные решетки и спектроскопы можно купить в Интернете. Так, например, голографическая дифракционная решетка в виде листа плёнки размером 6 × 12 дюймов стоит около 4 \$ (<http://www.ebay.com/>, diffraction grating). А цены на спектроскопы начинаются приблизительно от 1000 рублей и выше (<http://www.umnydom-nn.ru/?p=2690>, спектроскоп двухтрубный (школьный), <http://www.ebay.com/>, spectroscope).

Чтобы не тратить деньги, народные умельцы изготавливают простые самодельные спектроскопы, история создания которых начинается с появления компакт-дисков (CD) и цифровых видеодисков (DVD), которые являются простейшими и распространёнными в быту отражательными дифракционными решётками (<http://ru.wikipedia.org/wiki/>, Википедия: дифракционная решетка, компакт-диск, DVD). На поверхности компакт-диска информация записывается в виде углублений по спиральным дорожкам с шагом 1,6 мкм между витками (рисунок 1). Плоская поверхность и углубления на CD отражают свет по разному, поэтому размер 1,6 мкм – это период дифракционной решетки CD. Цифровой видеодиск (DVD) имеет шаг дорожки (период решетки) 0,74 мкм. Дифракционную решетку можно также охарактеризовать числом штрихов, приходящимся на 1 мм решетки. Для CD и DVD эти величины равны соответственно 625 и 1351 штрихов на 1 мм.

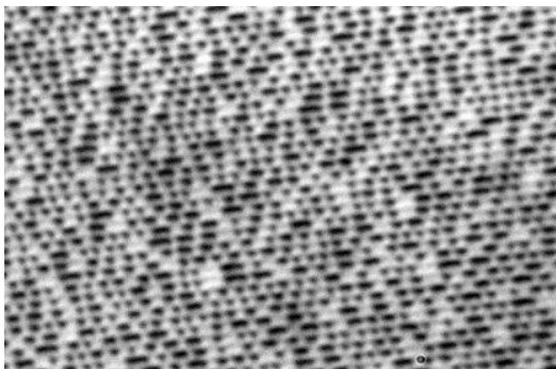


Рисунок 1 – Фотография поверхности CD через окуляр микроскопа

Примечание. В данной работе приводятся только фотографии авторов (и нет фотографий из Интернета).

Основная формула дифракционной решетки

В данной работе приведём только две формулы, без которых невозможно дальнейшее понимание конструкций самодельных спектроскопов.

Основная формула дифракционной решетки с периодом d :

$$d \sin \varphi = \pm k \lambda, \quad (1)$$

где φ – угол, под которым наблюдается k -й максимум для длины волны λ (обычно для наблюдения используют 1-й максимум, как наиболее яркий).

Из формулы (1) следует что, чем меньше период решетки d , тем больше угол отклонения света с длиной волны λ . А это значит, что изображение спектра на экране получится шире и его можно рассмотреть более подробно. Поэтому для изготовления самодельного спектроскопа лучше подходит DVD, имеющий период решетки в 2,2 раза меньше, чем у CD.

Проверим это экспериментально. Для этого надо вначале изготовить отражательную или прозрачную дифракционную решетку из лазерного диска.

Изготовление дифракционной решетки нужного размера

У авторов данной работы имелось для опытов несколько разных CD-ROM, CD-R, DVD-ROM и DVD-R, DVD+R двух видов, у которых:

1) отражающий слой находился на внешней поверхности прозрачного пластика;

2) отражающий слой находился внутри диска между двух тонких дисков из прозрачной пластмассы (расположение отражающего слоя легко определяется, если посмотреть в лупу на торец диска).

Необходимо было предварительно установить: какой конкретный диск пригоден для изготовления прозрачной или отражающей дифракционных решеток. И, кроме того, для изготовления спектроскопа чаще всего необходим фрагмент диска, а не диск целиком.

В Интернете советуют для изготовления **прозрачной дифракционной решетки** вырезать её ножницами из DVD-R и удалять отражающий слой при помощи скотча. Действительно, как показал личный опыт, на записываемых дисках отражающий слой легко удаляется скотчем либо сразу с поверхности (рисунок 2, CD), либо при расслаивании диска на два тонких пластиковых диска (рисунок 3, DVD).



Рисунок 2



Рисунок 3

От себя добавим, что в процессе разрезания ножницами не следует сильно изгибать диск, поскольку его хрупкая пластмасса скалывается или трескается с одновременным отслаиванием отражающего слоя (рисунок 4). Диск будет меньше деформироваться при разрезании, если точка разрезания

будет находиться подальше от оси вращения лезвий ножниц. Для получения прозрачных дифракционных решеток из DVD, диск желательно вначале расщелить на два тонких диска, получив при этом в два раза более гибкую пластмассу (которая режется легче и почти без сколов). Меньшие усилия при разрезании диска можно затратить, если использовать ножницы по металлу с прямыми и длинными режущими лезвиями.

Рисунок 4 – Трещина и отслоение отражающего слоя вдоль линии разреза ножницами. Из таких дисков можно изготовить только прозрачные дифракционные решетки, так как отражающий слой отслаивается легко и сразу



Для изготовления **отражательных дифракционных решеток** наиболее подходят CD-ROM и DVD-ROM, у которых отражательный слой очень прочно соединен с пластмассовой основой и он не удаляется полностью при помощи скотча (рисунок 5).

Рисунок 5 – Результаты попыток при помощи скотча удалить отражающий слой с поверхности CD-ROM и DVD-ROM (слой удаляется частично). Такие диски пригодны только для изготовления отражательных дифракционных решеток



Кроме разрезания дисков ножницами были испробованы и другие способы разделения дисков на фрагменты.

Можно использовать резак по пластику с загнутым «клювом» (только не надо при резке на него сильно давить, иначе будут трещины в пластмассе). Монолитные диски таким способом разрезаются, а диски, состоящие из двух частей, чаще всего расслаиваются на две половинки.

Можно использовать нагретую электрическим током проволоку (из спирали электроплитки). Режим резания подбирается экспериментально, но при этом важно, чтобы:

- 1) диаметр проволоки должен быть 0,3 мм (или чуть больше);
- 2) проволока должна быть бы не очень горячей;
- 3) скорость проплавления диска должна быть бы не очень высокой.

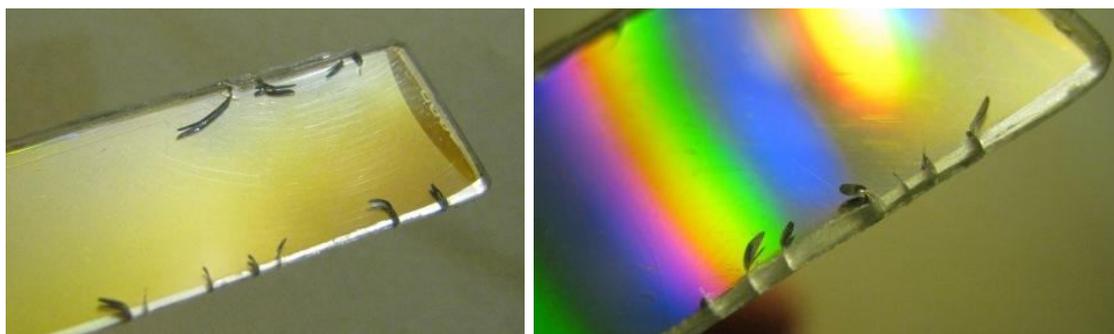
Если выполнить перечисленные условия, то при прохождении по диску горячей проволоки небольшое количество расплавленной пластмассы успевает быстро остыть и не прилипнуть к противоположной стороне разреза. Фрагмент диска при этом отделяется легко, без механических усилий.

Если же проволока тонкая и очень горячая, то она проплавляет диск очень быстро и горячая жидкая пластмасса слипается за проволокой по всей линии разреза. При этом фрагмент диска приходится с усилием отламывать, в результате чего на его краях появляются трещины (рисунок 6(а)).

Кроме того, необходимо, чтобы направление движения горячей проволоки было бы не только вдоль плоскости диска, но и перпендикулярно ей – по направлению от лицевой поверхности диска к задней, как показано на рисунке 6(б). В этом случае:

1) верхняя и нижняя части фрагмента диска хорошо свариваются друг с другом;

2) из разреза убирается много жидкой пластмассы и наплывы из горячей пластмассы располагаются в основном на нижней поверхности диска, откуда их можно будет потом аккуратно срезать канцелярским ножом (стараясь меньше деформировать хрупкую пластмассу).



а) трещины на краях фрагмента DVD после некачественного проплавления диска, с последующим отламыванием прилипшего фрагмента и грубой обработки его краёв напильником



б) два варианта движения горячей проволоки при разрезании диска (стрелками показано направление движения проволоки)

Рисунок 6

Для разделения диска на фрагменты была также попытка использовать выжигатель по дереву. Однако попытка была неудачной, поскольку нагревательный элемент выжигателя был достаточно толстый и получались большие наплывы из горячей жидкой пластмассы, которые часто слипались друг с другом. Фрагмент диска приходилось отламывать, а наплывы пластмассы с краёв удалять при помощи напильника или канцелярского ножа, при этом либо по краям пластмассы появлялись трещины (рисунок 6(а)), либо фрагмент диска вообще разваливался на верхнюю и нижнюю половинки.

Предварительные эксперименты

Из практического опыта известно, что цветную дифракционную картину на лазерном диске можно наблюдать на различных расстояниях от его поверхности, причем эта картина меняется в зависимости от расстояния до диска и от его наклона. Поэтому, чтобы не получилось продолжение басни И.А. Крылова «Мартышка и очки» в виде «Мартышка и DVD» надо сначала выяснить, откуда и куда следует подавать луч света на диск, и где должен находиться глаз наблюдателя. Это поможет усовершенствовать конструкции самодельных спектроскопов.

Оборудование для опытов.

Для создания узкого луча света, который направлялся на дифракционную решетку, использовалось следующее оборудование:

- детский фильмоскоп из советских времён (с лампой накаливания), в котором вместо диафильма устанавливался кусок картона с узкой щелью;
- настольная лампа (накаливания) и щель в вертикальном непрозрачном экране (экран изготавливался из картона от конфетной коробки);
- Солнце и щель в непрозрачном экране (согласно **принципу наоборот** можно приводить измерения не только в темной комнате, но и в ясный солнечный день, используя **вещественно-полевые ресурсы** окружающей среды – мощный источник света – Солнце).

Использовался также и горизонтальный экран из белого листа бумаги или картона.

Опыт 1 (классический: луч света падает перпендикулярно на решетку). Отражательная дифракционная решетка в виде фрагмента CD и DVD прямоугольной формы наклеивалась на кусочек картона, согнутого уголкообразно, подставкой. Фрагмент диска устанавливался перед вертикальным экраном со щелью, через которую на решетку падала узкая полоска белого света. Схема опыта показана на рисунке 7. Дифракционные спектры наблюдались на горизонтальном или вертикальном экранах (рисунок 8). (Для наблюдения спектров на горизонтальном экране необходимо наклонять решетку или экран навстречу падающему лучу или **наоборот** – наклонять луч).

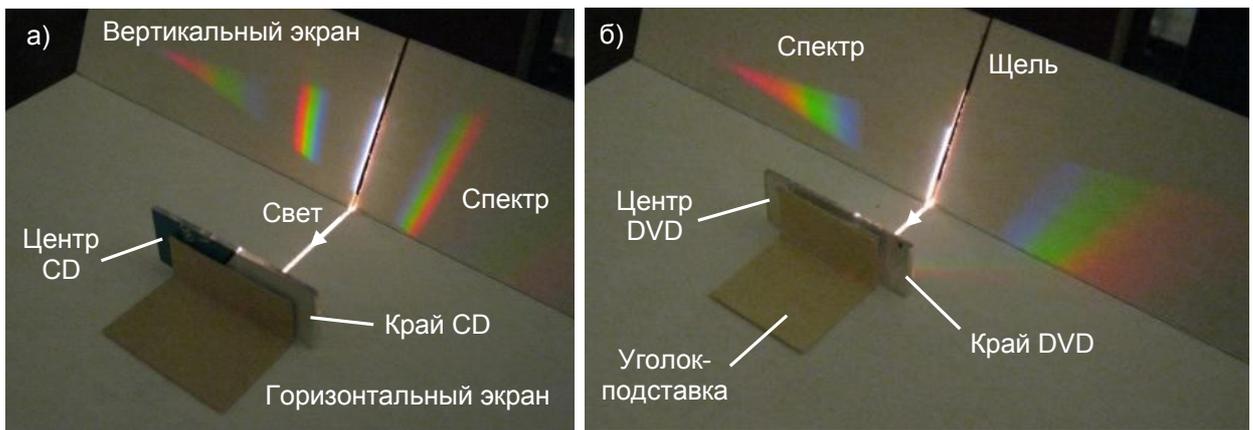
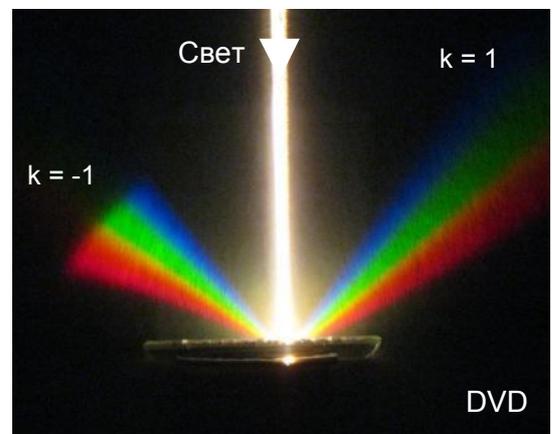
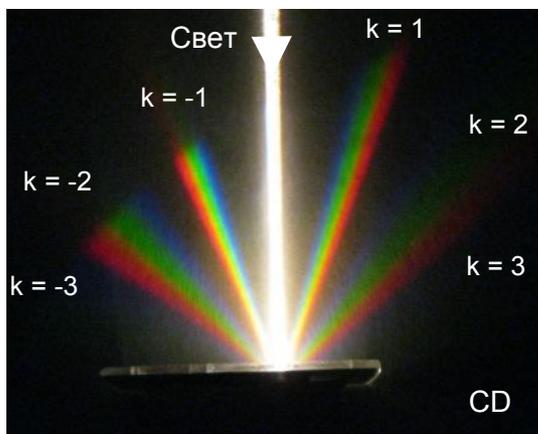
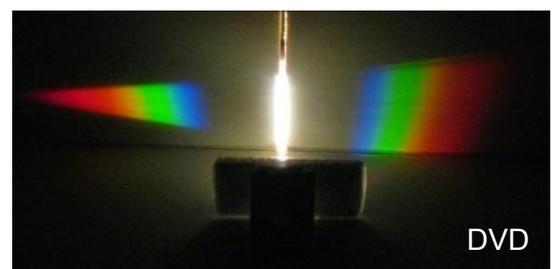


Рисунок 7 – Схема опыта с отражательными дифракционными решетками из CD (а) и DVD (б)

Спектры на горизонтальных экранах (стрелкой показан падающий луч света)



Спектры на вертикальных экранах



Фотографии подтверждают формулу (1): спектр 1-го порядка у решетки из DVD шире, чем из CD. Обращает на себя внимание следующий факт: спектр 2-го порядка у решетки из CD почти такого же размера и направления, как и спектр 1-го порядка у решетки из DVD. Следовательно, в схемах спектроскопов можно заменять DVD на CD. Однако у такой замены есть 2 недостатка: спектр 2-го порядка у CD менее яркий и вплотную примыкает к своему спектру 3-го порядка (т.е. красные и фиолетовые участки спектра накладываются друг на друга).

Рисунок 8 – Вид спектров на горизонтальном и вертикальном экранах от отражательных дифракционных решеток из CD и DVD

Вывод 1 (из рисунка 8). Для спектроскопов следует использовать дифракционные решетки из DVD, дающие более широкий и яркий спектр 1-го порядка. Поэтому в дальнейших исследованиях в основном использовались дифракционные решетки из DVD, а решетки из CD исследовались лишь для сравнения.

Для объяснения необычной формы спектров, изображённых на вертикальных экранах рисунков 7 и 8, предположим, что мы имеем три прямые (а не спиральные) дифракционные решетки $ДР_1$, $ДР_2$ и $ДР_3$, расположенные по дуге окружности (рисунок 9). Слева и справа от этих решеток изображены дифракционные спектры 1-го порядка. Суммарные спектры от всех трёх решеток на экране получаются: слева – малой высоты, справа – большой высоты.

Можно привести условную аналогию: спиральные дорожки на поверхности DVD аналогичны сферическим зеркалам для дифракционных спектров. В выпуклом зеркале, как в новогоднем шарике на ёлке, изображение спектра, видимое глазом, будет маленьким. Вогнутое зеркало фокусирует лучи, а, следовательно, может увеличивать изображение. Следовательно, глаз надо размещать вместо левого экрана на рисунке 9. Это подтверждается и экспериментально.

Следует, однако, отметить, что аналогия спиральных дорожек на диске и сферических зеркал очень условная (формулами для фокусного расстояния сферических зеркал пользоваться нельзя).

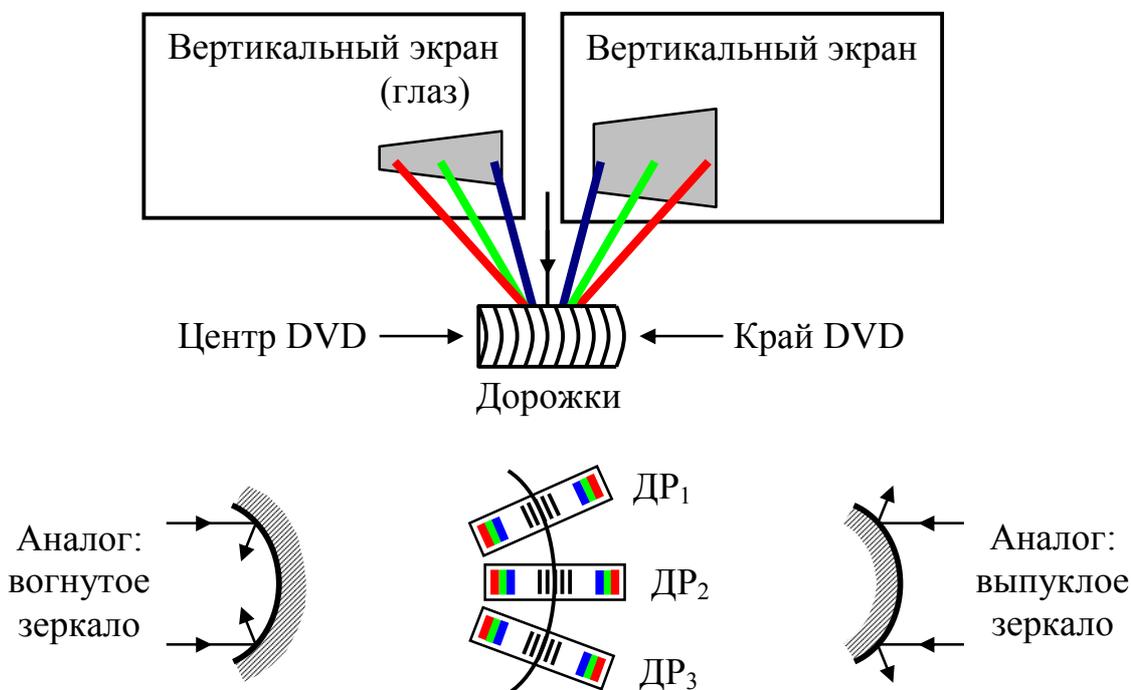


Рисунок 9 – Объяснение формы спектров из опыта 1 и условная аналогия DVD со сферическими зеркалами

Наклонное падение света на дифракционную решетку

А можно ли ещё уменьшить период дифракционной решетки? Тогда на очень широком изображении спектра можно будет детально рассмотреть все узкие и близко расположенные спектральные линии.

Физическое противоречие: период дифракционной решетки должен быть очень малым для получения широкого спектра, и он не может быть малым, поскольку решетка (из DVD) уже изготовлена с определённым периодом.

Физически это сделать невозможно (мы не можем сблизить спиральные дорожки на DVD), а **геометрически** это сделать легко, если применить изобретательский **принцип перехода в другое измерение** – надо наклонить объект: пусть луч света падает на дифракционную решетку наклонно, а не перпендикулярно.

Этот случай рассматривается в работе (Элементарный учебник физики. В 3-х т. / Под ред. Г.С. Ландсберга. Т. III. Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная физика. § 138. Дифракция при косом падении света на решетку.). Приведём рисунок из этой книги (рисунок 10), на котором изображена прозрачная дифракционная решетка (однако все рассуждения справедливы и для отражательной решетки).

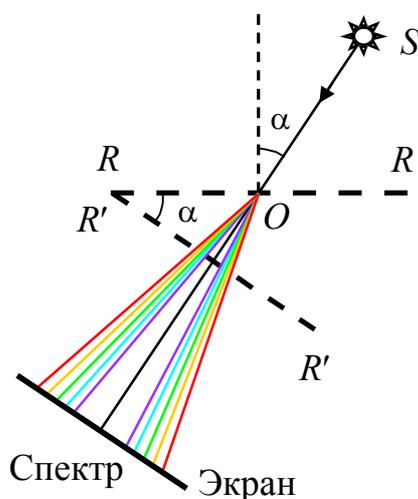


Рисунок 10 – Схематическое изображение дифракции при косом падении луча SO на решетку RR .

При косом падении луча света дифракция происходит так, как если бы решетка RR была заменена другой $R'R'$, представляющей её проекцию на направление, перпендикулярное к падающим лучам. Периодом «новой» дифракционной решетки $R'R'$ будет величина d' :

$$d' = d \cos \alpha. \quad (2)$$

В тех случаях, когда угол падения α близок к 90° (скользящее падение), период d' может быть гораздо меньше, чем период действительной решетки d . Это иллюстрируется результатами расчётов, приведёнными в таблице 1.

Чтобы заполнить таблицу 1, определялся реальный период дифракционной решетки для одного из DVD. Использовалась красная лазерная указка с длиной волны 630–680 нм (в среднем 655 нм). При перпендикулярном падении луча на DVD угол отклонения 1-го максимума от перпендикуляра составил 63° (рисунок 11). По формуле (1) был рассчитан период решетки для данного конкретного диска. Он оказался равен 0,735 мкм (следовательно, решетка имела 1360 штрихов на 1 мм).



Рисунок 11 – Определение периода решетки на горизонтальном экране при помощи лазерной указки и транспорта (другой более точный способ заключается в том, что на вертикальном экране линейкой измеряется расстояние между максимумами 1-го порядка, а затем угол вычисляется по формулам для прямоугольного треугольника)

Таблица 1 – Изменение параметров дифракционной решетки при наклонном падении луча света

Угол падения α	$\cos \alpha$	Период, мкм	Штрихи на 1 мм	Отношение d / d'
0°	1	$d = 0,735$	1360	1
10°	0,985	$d' = 0,724$	1381	1,02
20°	0,940	$d' = 0,691$	1447	1,06
30°	0,866	$d' = 0,637$	1570	1,15
40°	0,766	$d' = 0,563$	1776	1,31
45°	0,707	$d' = 0,520$	1923	1,41
50°	0,643	$d' = 0,473$	2114	1,55
60°	0,500	$d' = 0,368$	2717	2,00
70°	0,342	$d' = 0,251$	3984	2,93
80°	0,174	$d' = 0,128$	7813	5,74
81°	0,156	$d' = 0,115$	8696	6,39
82°	0,139	$d' = 0,102$	9804	7,21
83°	0,122	$d' = 0,090$	11111	8,17
84°	0,105	$d' = 0,077$	12987	9,55
85°	0,087	$d' = 0,064$	15625	11,48

В таблице 1 интерес представляет последний столбец – отношение реального периода решетки к «геометрическому». Можно сделать 2 вывода.

Вывод 2. Можно поворачивать решетку в обе стороны на «плюс-минус» 45° , а её период при этом меняется незначительно (в 1,41 раза). Это означает, что размеры спектра на экране и его месторасположение почти не изменяются при небольших поворотах дифракционной решетки.

Вывод 3. Если на дифракционную решетку подавать скользкий луч с углом падения 70° – 85° , то «геометрический» период решетки уменьшается в 3–11,5 раза, при этом спектральная картина становится в несколько раз шире и видны раздельно близко расположенные спектральные линии.

Продолжение предварительных экспериментов

Проверим теоретические расчеты экспериментально, направляя на решетку наклонные лучи с разными углами падения.

Опыт 2. Дифракционная решетка из фрагмента DVD устанавливалась вертикально на горизонтальном экране. На решетку направлялась узкая полоска света от лампы накаливания под разными углами падения. Решетка была прозрачной, и это позволяло наблюдать спектры, сформированные после прохождения светом решетки и отраженные от её гладкой поверхности. Схема опыта и получившиеся спектры показаны на рисунке 12, на котором стрелками изображены направления лучей света.

Действительно, как видно из рисунка 12, дифракционные спектры имеют хорошую пространственную устойчивость при поворотах дифракционной решетки на десятки градусов.

Из представленных на рисунке 12 фотографий необходимо выбрать ту, на которой расположение лучей и спектров наиболее подходит для создания самодельного спектроскопа. Это будет последняя – 12-я фотография. На ней лучи на дифракционную решетку падают с большим наклоном и отмечены условными изображениями места расположения глаза наблюдателя.

Таким образом, для создания спектроскопа можно использовать как прозрачную, так и отражательную дифракционную решетку из DVD. При этом схема взаимного расположения лучей, решетки и спектров показана на 12-й фотографии рисунка 12.

Опыт 3. Луч света от лампы накаливания падает на дифракционную решетку наклонно (от центра к краю DVD) и параллельно вертикальному экрану, а дифракционный спектр направляется перпендикулярно этому экрану (рисунок 13). Угол падения при этом составляет около 80° (скользящий луч к плоскости DVD – 10°). Такое расположение лучей удобно для дальнейшего конструирования спектроскопов, когда входной луч распространяется внутри спектроскопа параллельно его стенкам, а на месте экрана можно расположить выходное (смотровое) окно для глаза наблюдателя.

Схема опыта 2

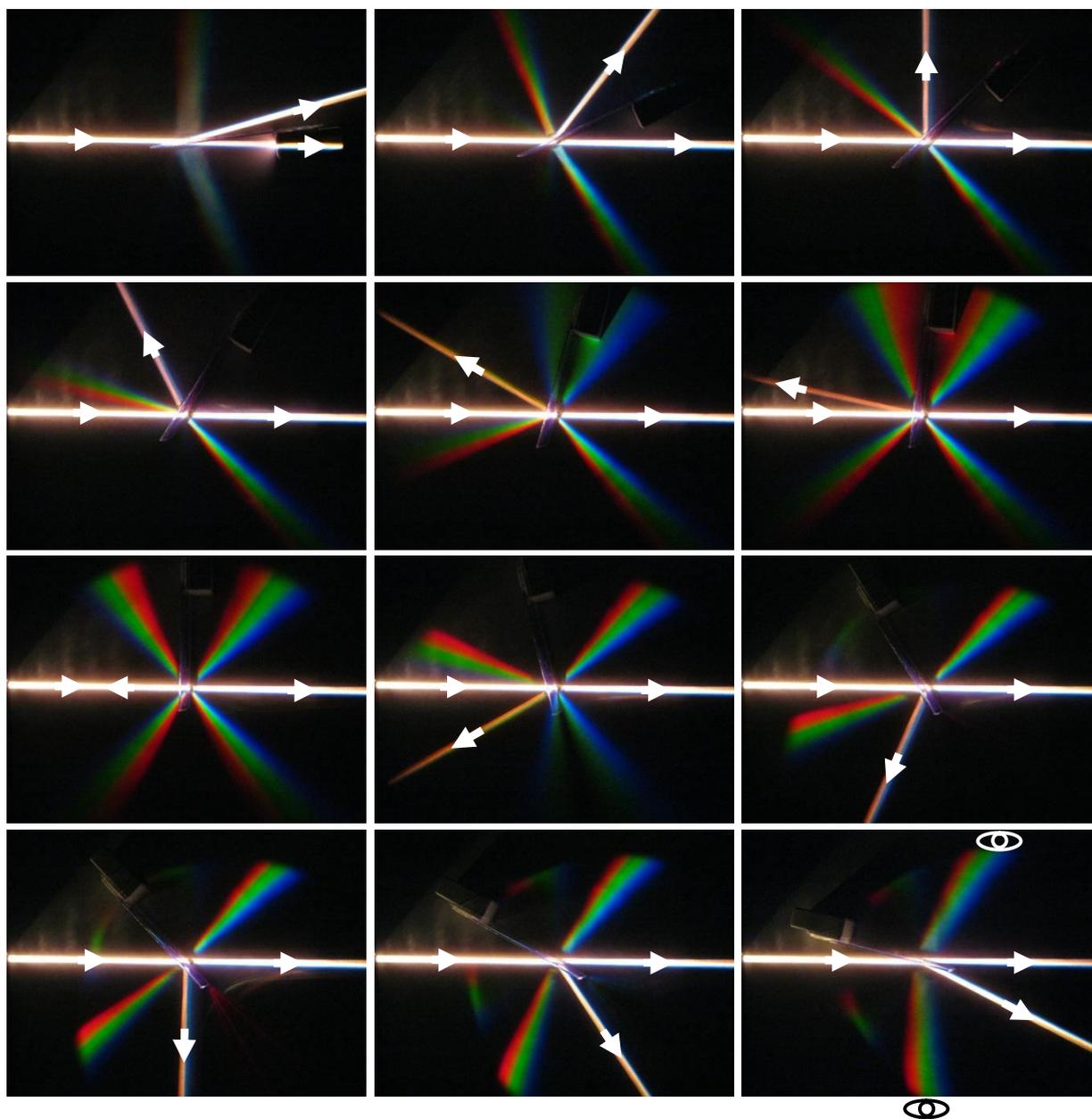
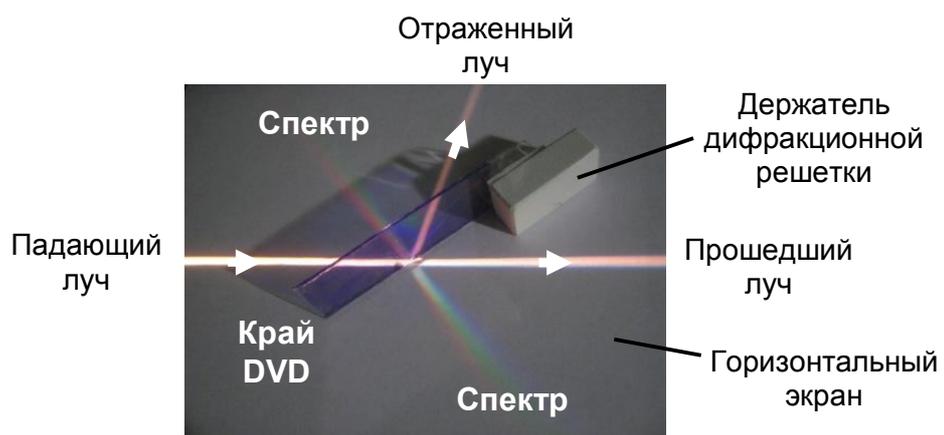


Рисунок 12 – Виды спектров на горизонтальном экране при разном расположении дифракционной решетки относительно падающего луча

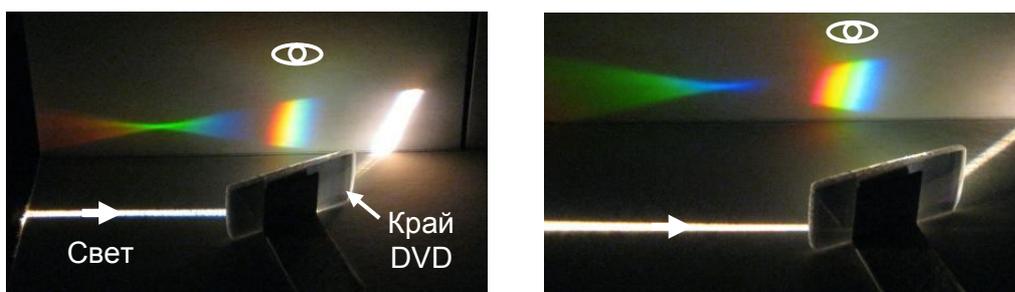


Рисунок 13 – Геометрическое расположение лучей, спектров и глаза наблюдателя при наклонном падении луча на отражательную дифракционную решетку из DVD

Вывод 4 (из рисунков 12 и 13). DVD можно использовать в оптических схемах и как обычное зеркало (угол падения равен углу отражения) (новая функция, которую можно получить и по методу Робинзона Крузо).

Вывод 5 (из рисунков 12 и 13). Лампы накаливания имеют сплошной (непрерывный) спектр.

Теперь рассмотрим опыты, позволяющие получить спектр максимального размера.

Опыт 4. DVD устанавливался на столе вертикально, а на его оптической оси размещалась электрическая лампочка накаливания от карманного фонаря на разных расстояниях L от поверхности диска (рисунок 14).

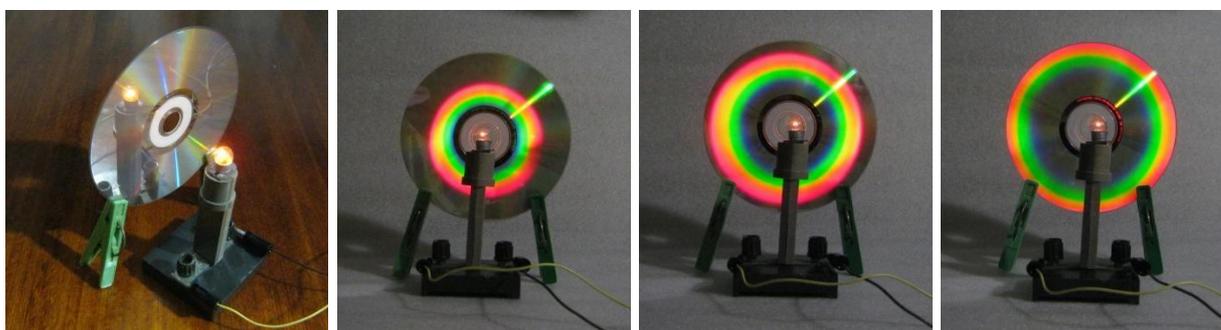


Схема опыта

$L = 3,5$ см

$L = 4,5$ см

$L = 5,5$ см

Рисунок 14 – Вид дифракционных спектров от лампочки, расположенной на разном расстоянии L от центра DVD

Картинки, изображённые на рисунке 14, можно наблюдать и другим, более простым способом, если в одну руку взять DVD, а другой рукой поднести к центру диска горящую спичку на расстоянии 3–5 см от диска (рисунок 15).

Из рисунков 14 и 15 можно сделать следующие выводы.

Вывод 6. Чтобы наблюдать весь спектр (от фиолетового до красного) свет должен падать на все дорожки диска (от центра и до края).



Рисунок 15

Вывод 7. Чтобы наблюдать весь спектр на поверхности DVD (а не его часть), источник света должен находиться на оптимальном расстоянии до диска (4,5 см до центра диска или 6 см до центральных спиральных дорожек).

Вывод 8. Можно получить **сверхэффект** от опыта 4, если использовать схему опыта в виде дизайнерского решения для создания декоративного освещения комнаты, когда один диск, а лучше **полисистема** из многих дисков расположена на стене или потолке комнаты, а над центрами дисков на расстоянии 4,5 см расположены отдельные лампочки, светодиоды или светодиодные ленты.

Перемещение по диску цветных кругов на рисунке 14 можно объяснить следующим образом. Возьмём для определённости середину спектра – зелёный луч. Существует определённый угол падения α белого луча на поверхность диска, при котором зелёный луч в спектре будет наблюдаться под прямым углом к поверхности диска – пусть это будет положение источника света S_1 на рисунке 16. Если наблюдатель смотрит на диск, то он видит зелёную окружность. Теперь будем перемещать источник света дальше от диска (положения S_2 и S_3 на рисунке 16). Так как угол α должен сохраняться, условие перпендикулярности зелёных лучей будет выполняться для более далёких от центра дифракционных дорожек, и зелёная окружность будет расширяться. Это мы и видим на рисунке 14. Аналогичные рассуждения можно привести и для других цветных лучей.

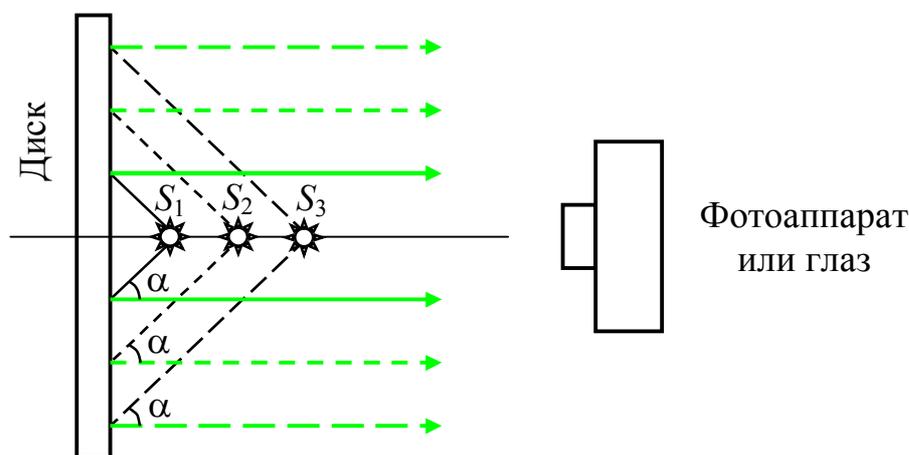


Рисунок 16 – Схема для объяснения фотографий, изображённых на рисунке 14

Как видно из рисунков 7, 8 и 13, DVD имеет как бы «фокусирующее» свойство (лучи сходятся в точку). Поэтому по аналогии опытов с линзами глаз наблюдателя должен находиться в определённом месте оптической системы для того, чтобы видеть «увеличенное изображение».

Опыт 5. В качестве источников света использовались две компактные люминесцентные лампы разных производителей. Лампы устанавливались поочередно на пол в одном конце комнаты, а DVD размещался на полу горизонтально в другом конце комнаты на расстоянии 3,5 м от лампы. Угол падения лучей на DVD составлял 85° (скользящий угол к плоскости DVD – 5°). Фотоаппарат (или глаз наблюдателя) постепенно приближался к плоскости диска почти по перпендикуляру. Наблюдаемые картинка спектра фотографировались. Результаты экспериментов представлены на рисунке 17, на котором буквой h обозначено расстояние от глаза (объектива фотоаппарата) до поверхности диска.

Одним из недостатков (компактных) люминесцентных ламп является их линейчатый спектр, который вызывает искажения цвета освещённых предметов и приводит к повышенной усталости глаз. Существуют также и люминесцентные лампы с улучшенной цветопередачей, имеющие спектр близкий к непрерывному. Оба спектра представлены на рисунке 17. Параметр, характеризующий уровень соответствия естественного цвета тела видимому (кажущемуся) цвету этого тела при освещении его данным источником света называется «индексом цветопередачи». (О люминесцентных лампах и индексе цветопередачи можно более подробно узнать из Википедии.)



Источники света

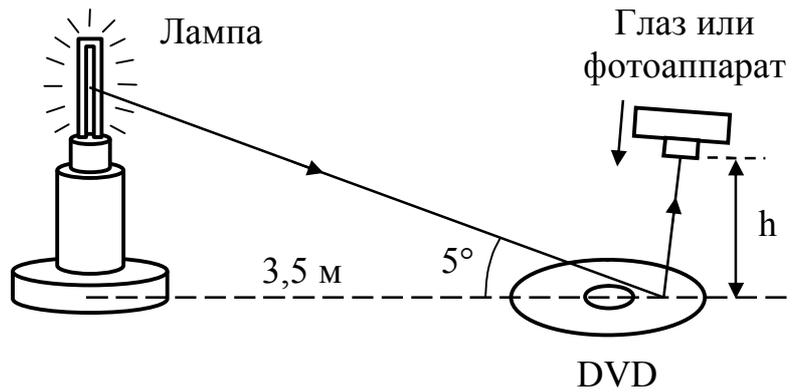
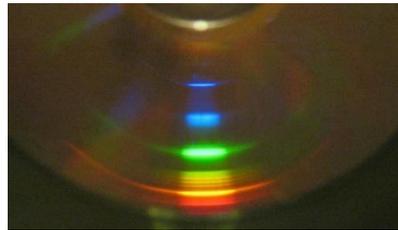
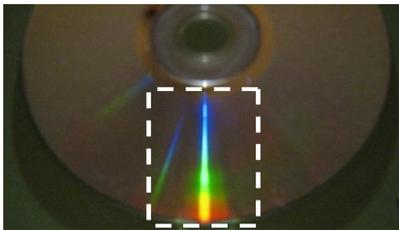
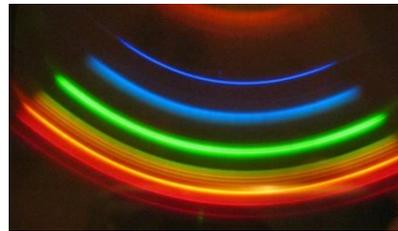
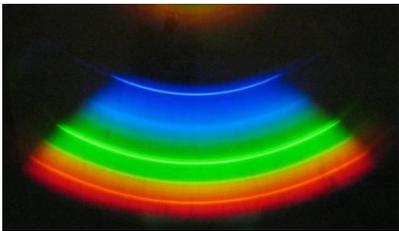
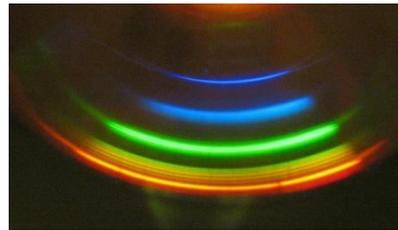


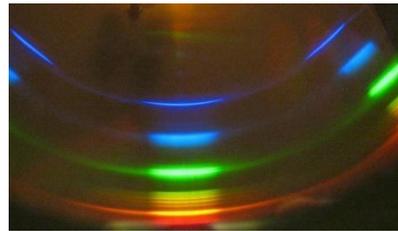
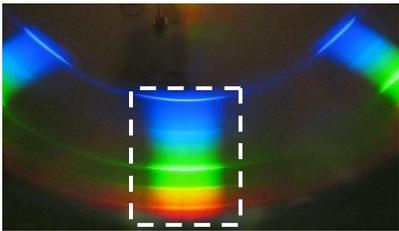
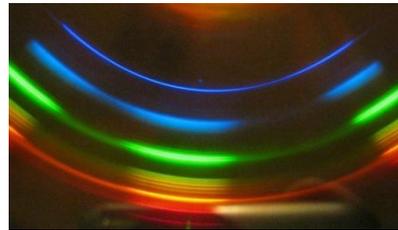
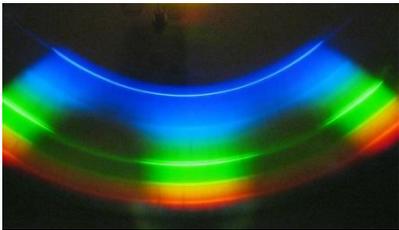
Схема опыта 4



Если из DVD вырезать фрагмент для изготовления спектроסקопа (пунктирный прямоугольник на фотографии), и глаз находится на большом расстоянии h от DVD, то можно увидеть только небольшую полоску спектра.



Оптимальное расстояние h от глаза до поверхности диска равно приблизительно 6 см. В этом случае большое изображение спектра занимает почти четверть площади диска.



Если из DVD вырезать кусок для изготовления спектроסקопа (пунктирный прямоугольник), то при очень близком расположении глаза до поверхности диска (1–3 см) опять видна только небольшая полоска спектра.

Рисунок 17 – Экспериментальное определение наилучшего расстояния глаза до диска для наблюдения спектра максимального размера

Вывод 9 (из рисунка 17). Существует оптимальное расстояние от глаза до поверхности DVD, при котором спектр наблюдается на большой площади диска. Это расстояние составляет приблизительно 5 см до центральных спиральных дорожек диска, 6 см – до средних и 7 см – до крайних. Таким образом, если в самодельный спектроскоп смотреть с расстояния 5–7 см от фрагмента DVD, то картинка спектра будет «на весь экран».

Вывод 10 (из рисунка 17). Можно получить **идеальный спектроскоп (ИКР)**, состоящий только из DVD (без других элементов оптической схемы). Надо только геометрически правильно сориентировать диск относительно источника света и глаза: плоскость диска устанавливается почти параллельно направлению на источник света (с углом падения $80^\circ - 85^\circ$), а глаз смотрит на диск сверху с расстояния 6 см (толщина трёх сложенных пальцев руки). Тогда получившаяся дифракционная решетка в 9000–15000 штрихов на 1 мм (см. таблицу 1), превратит свет от любого источника в широкий спектр. (Однако, чтобы получить очень чёткую дифракционную картину, лампа должна представлять почти точечный источник света, т.е. находиться на расстоянии нескольких метров от DVD.)

Обзор конструкций самодельных спектроскопов из Интернета, изготовление и совершенствование двух из них

Чтобы не «изобретать велосипед», надо вначале посмотреть, какие конструкции спектроскопов уже известны.

По ключевым словам «Самодельный спектроскоп (спектрограф, спектрометр)», «Спектроскоп из DVD (CD, диска)», «Спектроскоп своими руками», «Дифракционный спектроскоп» можно найти несколько различных конструкций спектроскопов с отражательными и прозрачными дифракционными решетками, вырезанными из DVD.

С позиций ТРИЗ это называется стихийным (интуитивным) применением **метода Робинзона Крузо**, когда у объекта (DVD) выявляются и используются новые свойства. С другой стороны, это **использование внутри-системных функциональных ресурсов DVD**.

Две конструкции спектроскопа (в отражённом и проходящем свете) предложены в работе (Дифракционный спектроскоп, http://licrym.org/index.php/%D0%94%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D1%81%D0%BF%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%BF).

Спектроскоп из целого диска, размещённого в большой коробке, рассмотрен в работе (Building a simple spectroscope, http://sci-toys.com/scitoys/scitoys/light/cd_spectroscope/spectroscope.html).

В работе (Foldable Mini-Spectrometer, <http://publiclab.org/wiki/foldable-spec>) показано, как можно собрать спектроскоп, используя картонную выкройку и прозрачную дифракционную решетку из DVD-R.

По ссылке (<http://aquariymist.4admins.ru/viewtopic.php?f=32&t=3226>, Самодельный спектроскоп, изучение спектров аквариумных ламп) можно посмотреть на самодельный спектроскоп с корпусом из спичечных коробок.

В работе (CD/DVD spectroscope, http://www.iucaa.ernet.in/~scipop/Obsetion/spectro/crd_brd_spectro.htm) показан процесс изготовления картонного спектроскопа в виде треугольного «домика», устанавливаемого на диск. По ссылке (http://www.iucaa.ernet.in/~scipop/Obsetion/spectro/iucaa_mvs_spectroscope.pdf) можно скачать выкройку и распечатать её на листе формата А4. Выкройка была распечатана и такой спектроскоп был изготовлен (рисунок 18).

Угол падения луча на диск в этом спектроскопе составляет около 75° . Спектры наблюдать можно, но у данной конструкции выявлены следующие **недостатки**:

- выходное окно для глаза наблюдателя очень маленькое и находится на расстоянии всего 1 см от диска, в результате видна только небольшая полоска спектра (рисунок 19);
- поверхность диска загрязняется отпечатками пальцев рук, что снижает чёткость линий спектра;
- очень трудно нацелиться тонкой щелью спектроскопа на источник света, когда взгляд направлен вниз, а источник света находится впереди.

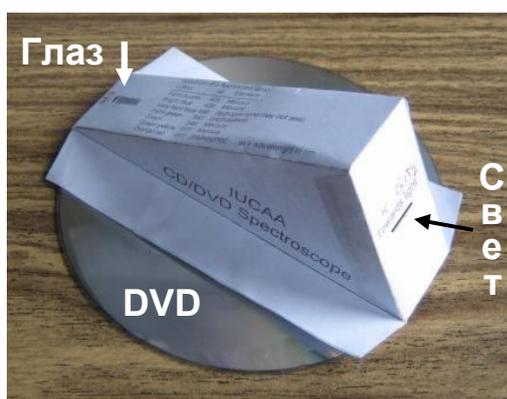


Рисунок 18

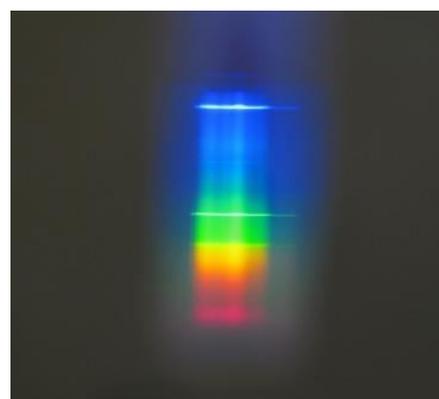


Рисунок 19

Первые два недостатка устраняются легко. Для этого надо расположить выходное окно подальше от поверхности диска и сделать большие бумажные «крылья», чтобы пальцами не касаться диска.

Авторами данной работы была разработана более совершенная конструкция спектроскопа, которая представлена на рисунке 20. Из картона от конфетной коробки изготавливался параллелепипед высотой 45 мм, шириной 30 мм и длиной 125 мм, имеющий входную щель для света шириной 1 мм на

расстоянии 12 мм от нижней поверхности. Сверху располагалось выходное окно для глаза наблюдателя (18 × 18 мм), а снизу – окно для DVD размерами 37 × 30 мм, причем нижнее окно для DVD было смещено на 5 мм от края к центру. Картонный параллелепипед имел «крылья» (размерами 45 × 125 мм), при помощи которых можно пальцами плотно прижать DVD к нижней поверхности параллелепипеда. Внутренние поверхности спектроскопа покрашены черной акварельной краской для устранения световых бликов. За счет оптимального расположения элементов конструкции спектроскопа число штрихов на 1 мм у дифракционной решетки геометрически возрастает до 10 000 и в выходное окно наблюдается «картинка» спектра большого размера. Для примера на рисунке 21 показан спектр компактной люминесцентной лампы при использовании двух дисков – CD и DVD.

Опытным путем установлено, что разные DVD (и CD) существенно отличаются друг от друга качеством «картинки» спектра. Поэтому необходимо из дисков выбрать такой, который дает яркие, «сочные» цвета и чёткое изображение спектральных линий (рисунок 21). Именно конструкция спектроскопа, изображенная на рисунке 20, позволяет быстро выбрать лучший диск (не разрезая его). Например, из имеющихся у авторов нескольких разных DVD, хорошую яркость и контрастность спектра давали диски DVD-R.

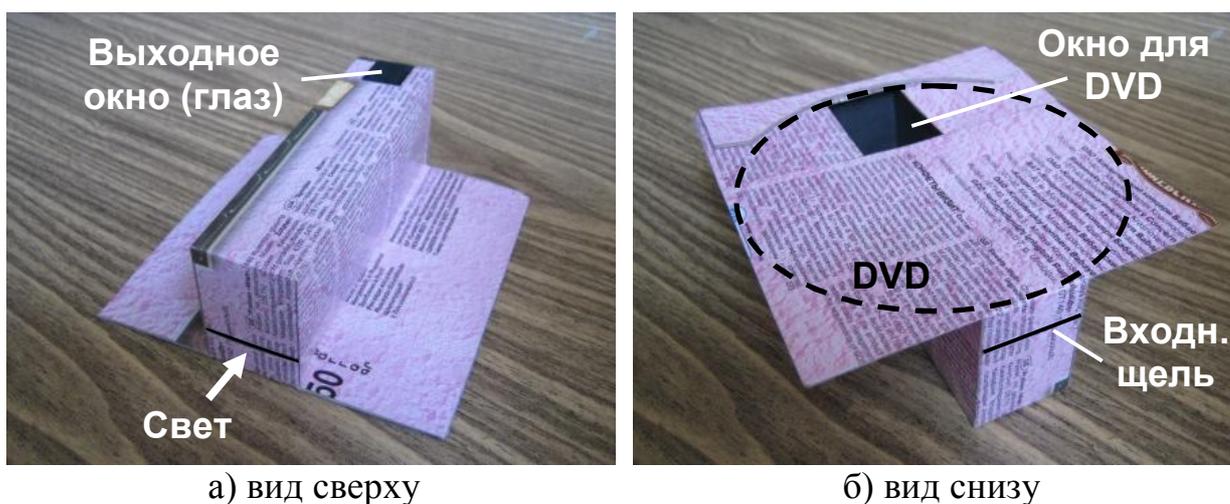


Рисунок 20

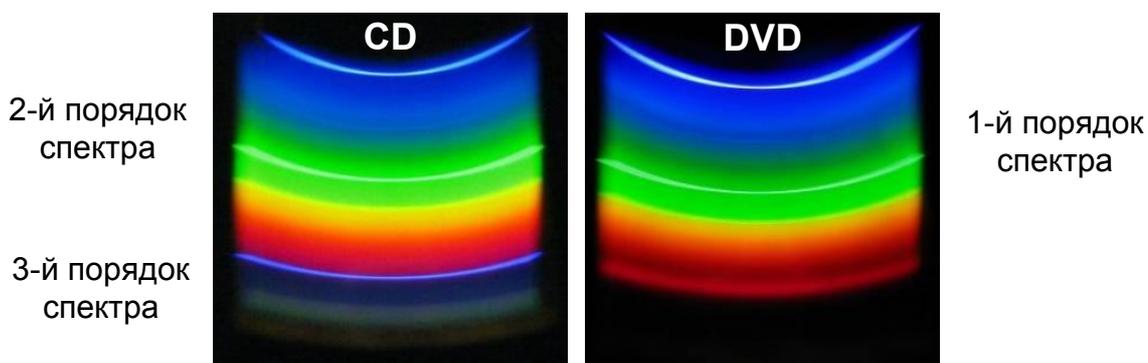


Рисунок 21 – Фотографии спектров компактной люминесцентной лампы, полученных при использовании двух дисков – CD и DVD

У спектроскопа, изображенного на рисунке 20, также обнаружился **недостаток** – диск пылился, иногда падал со стола или из рук и на нём появлялись царапины. Применим **принцип объединения** – соединим прочно диск и спектроскоп (рисунок 22): диск находится в картонном конверте снизу (**би-система** – второе дно у спектроскопа).

Для любителей и дальше совершенствовать данную конструкцию можно предложить ещё две её доработки: 1) сделать клапан к конверту, для предотвращения самопроизвольного выпадения диска при наклоне спектроскопа вперёд; 2) уменьшить габариты спектроскопа почти до размеров верхнего параллелепипеда, если убрать «крылья» и использовать вместо целого DVD его фрагмент площадью чуть больше нижнего окна.



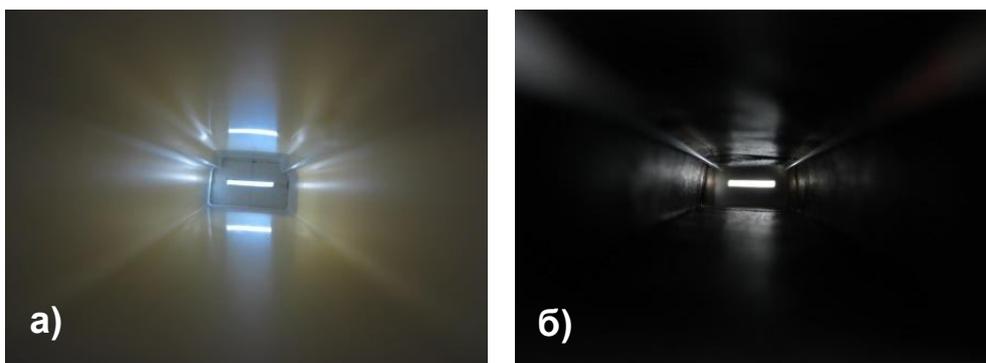
Рисунок 22 – Спектроскоп с картонным конвертом для DVD

Рассмотрим ещё одну конструкцию спектроскопа из Интернета (<http://astroexperiment.ru/sam/spectroscop.shtml>, Спектроскоп из CD). Спектроскоп выполнен в кабель-канале длиной около 20 см. Щель сделана из двух лезвий с просветом 0,2–0,3 мм. Фрагмент диска приклеен двухсторонним скотчем на клин из пробки или пенопласта. Угол клина 20° – 25° .

Такая конструкция с увеличенным выходным окном была изготовлена авторами данной статьи (рисунок 23). При изготовлении внутреннюю поверхность обязательно покрывать чем-то чёрным и матовым, поскольку от гладких пластмассовых стенок происходит отражение, и появляются (как в детском калейдоскопе) множество изображений (отражений) щелей, спектры от которых накладываются друг на друга (рисунок 24).



Рисунок 23 – Спектроскоп в кабель-канале (спичечная коробка положена для масштаба)



- а) белые и гладкие стенки кабель-канала дают дополнительно 4 отраженных изображения центральной щели;
 б) к стенкам кабель-канала приклеена чёрная бумага

Рисунок 24

У конструкции, изображённой на рисунке 23 выявлено 2 основных **недостатка**: 1) глаз находится не на оптимальном расстоянии от DVD (5–7 см); 2) трудно нацелить спектроскоп по направлению на источник света, так как глаз смотрит перпендикулярно этому направлению (а хотелось бы: куда смотришь, там и появляется спектр по аналогии с биноклем или подзорной трубой).

Оба этих недостатка устраняются решением, которое очевидно и без ТРИЗ, если вспомнить геометрическую оптику: надо над выходным окном спектроскопа (рисунок 23) установить зеркало (как в перископе), наклонённое под углом 45° . Но при этом возникают две новые задачи.

Задача 1. Что использовать в качестве зеркала?

Решение задачи 1. Можно пойти по пути психологической инерции, купив стеклянное зеркало в галантерейных товарах и вырезав из него нужный фрагмент. Но стекло – хрупкое, острое, тяжелое и требует навыков при обработке. Поэтому воспользуемся функциональными **вещественно-полевыми ресурсами**: пусть второй фрагмент DVD будет выполнять функцию зеркала (рисунки 12 и 13, *вывод 4*). Получаем из двух фрагментов DVD **би-систему со сдвинутыми оптически характеристиками** (дифракционная решетка и зеркало), при этом второй спектр от второго фрагмента DVD не попадает в глаз наблюдателя.

Задача 2. Как не сломать и не поцарапать зеркало над выходным окном при транспортировке спектроскопа в кармане или при хранении его в ящике стола?

Решение задачи 2. Можно закрыть выступающее за корпус зеркало защитным чехлом, и тогда спектроскоп будет иметь форму клюшки (буквы «Г»), а это некрасиво. Можно убрать зеркало полностью внутрь корпуса, увеличив весь корпус по высоте в 2 раза – это противоречит закону увеличения идеальности (габариты должны уменьшаться). Остаётся вспомнить **закон повышения динамичности** (шарниры) и **принцип динамичности** (при транспортировке и хранении спектроскопа – зеркала нет, а для наблюдения спектра – зеркало есть).

Техническая реализация этих решений показана на рисунке 25. Спектроскоп выполнен в пластмассовом корпусе для зубной щетки. Для наблюдения спектра шарнир с зеркалом открывается до тех пор, пока в зеркале не будет видна дифракционная решетка. Спектроскоп берут в руку и как подозрительную трубу направляют на источник света. Кисть руки, держащая спектроскоп, и установленное перед глазом зеркало выполняют роль экрана, закрывая глаз от прямых лучей источника света.

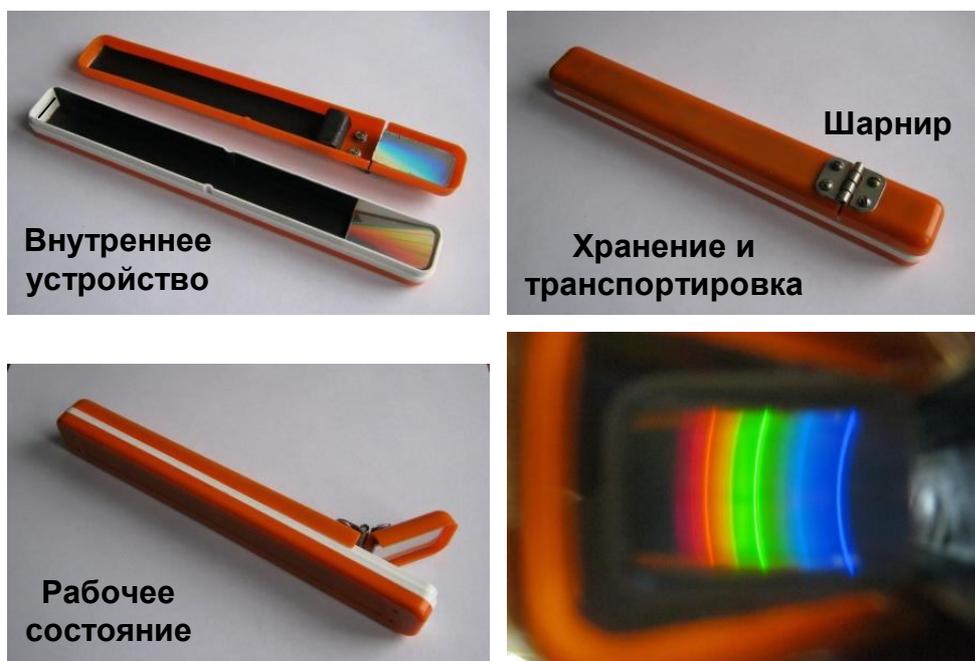


Рисунок 25 – Спектроскоп в футляре для зубной щетки с зеркалом из DVD на шарнире

Разработка новых конструкций спектроскопов

Проведя предварительные исследования, рассмотрев известные конструкции и улучшив их, авторы данной работы уточнили для себя цели разработки более совершенных конструкций спектроскопов:

- спектроскопы должны быть малогабаритными (карманный вариант, а не настольный);
- спектроскопы должны быть удобными в работе, при транспортировке и хранении;
- видимая глазом «картинка» спектра должна быть максимально широкой и высокой;
- стоимость спектроскопа должна приближаться к нулю («сделай сам из подручных материалов» с использованием «копеечных» или бесплатных ресурсов).

В ходе эксплуатации спектроскопов, изображенных на рисунках 20 и 25, был выявлен ещё один их **недостаток**: наблюдение спектра осуществляется одним глазом, а второй глаз надо крепко зажмурить. Несколько минут таких наблюдений с перекошенным лицом сильно утомляют мышцы лица.

Задача 3. Как наблюдать спектр, когда оба глаза открыты (не зажимать второй глаз)?

Решение задачи 3. Принцип перехода в другое измерение: необходимо развернуть корпус спектроскопа (рисунок 25) на 90° и расположить его вдоль обоих глаз. Тогда один глаз будет смотреть в выходное окно, а для второго глаза корпус спектроскопа будет выполнять роль непрозрачного экрана, защищающую глаз от прямых лучей источника света. Зеркало при этом лучше перенести к входной щели. Техническая реализация этого решения в корпусах от двух спичечных коробок показана на рисунке 26. Выходное окно и входная щель закрыты тонким прозрачным пластиком, вырезанным из упаковки от мелких бытовых товаров. Защитный прозрачный пластик не допускает попадания внутрь спектроскопа пыли и мусора, а также придаёт жесткость всей конструкции. (Вместо прозрачного пластика можно использовать кусочки предметных стёкол.) Для наблюдения спектра спектроскоп подносится к обоим глазам, как бинокль, и в том месте, где располагается источник света, наблюдается его спектр. Глаз находится на оптимальном расстоянии 6 см от дифракционной решетки, поскольку решетка находится в глубине корпуса спектроскопа, а переносица на лице не даёт возможности подносить спектроскоп очень близко к глазу.

У данного решения имеется **сверхэффект** – можно регулировать ширину щели и рассматривать спектр не только от ярких источников света, но и от слабых. Для изменения ширины щели надо просто сдвинуть внутреннюю спичечную коробку относительно внешнего корпуса.



Монтаж фрагментов DVD осуществляется при помощи двухстороннего скотча на вспененной основе (это удобно и для юстировки оптической системы).

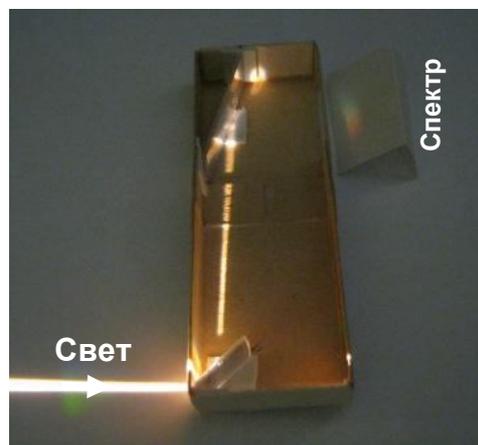


Рисунок 26 – Горизонтальная конструкция спектроскопа с зеркалом

В простых самодельных спектро스코пах имеется только входная щель и дифракционная решетка. От ширины щели и её расстояния до решетки зависит качество изображения. Чем меньше ширина щели, тем более чёткими, но менее яркими получаются спектральные линии (и наоборот). У простых спектроскопов со щелью имеется ещё один **недостаток**. Изображение всего спектра (от фиолетового до красного) получается одинаковой яркости только в том случае, если щель широкая или источник света располагается близко к узкой щели. В этом случае широкий луч света освещает всю поверхность дифракционной решетки и виден весь спектр (см. рисунок 14 и *вывод* 6). Если внутри спектроскопа распространяется узкий луч света (от узкой щели или от точечного источника света), то освещается только узкая часть дифракционной решетки (рисунок 26) и ярко видна лишь небольшая часть спектра. Чтобы рассмотреть весь спектр, приходится поворачивать спектроскоп из стороны в сторону (рисунок 27).



Рисунок 27 – Неравномерная яркость участков спектра, если в спектроскопе узкая входная щель или источник света точечный

Задача 4. Имеем **физическое противоречие**: входная щель спектроскопа **должна быть узкой**, чтобы обеспечить чёткость спектральных линий, и **должна быть широкой**, чтобы осветить всю поверхность дифракционной решетки для обеспечения равномерной яркости изображения спектра во всех его участках.

Решение задачи 4. Как превратить узкий луч в широкий? Вспоминая геометрическую оптику, применим **принцип сферидальности** и заменим плоское зеркало криволинейным, а точнее выпуклым цилиндрическим. Как мы знаем из практического опыта, при отражении от блестящей цилиндрической поверхности любой источник света превращается в узкую ярко светящуюся полосу, которую мы можем теперь использовать вместо входной щели для спектроскопа. (Два элемента оптической системы (щель и плоское зеркало) свернулись в один – цилиндрическое зеркало.)

Блестящие цилиндрические трубки и предметы можно найти в магазинах сантехники, а также среди товаров для кухни и мебельной фурнитуры (ножки, ручки). Часть из таких предметов показана на рисунке 28. Цилиндрическим зеркалом может стать и фольга (от шоколадки, конфеты, солнцезащитной плёнки), обёрнутая вокруг пластмассовой сердцевины от использованного скотча.



Рисунок 28 – Цилиндрические «зеркала», освещенные настольной лампой

Из рисунка 29 видно, что отраженный от цилиндрического зеркала свет расходится «веером», следовательно, в спектрографе будет освещена вся поверхность дифракционной решетки, и будет наблюдаться весь спектр.

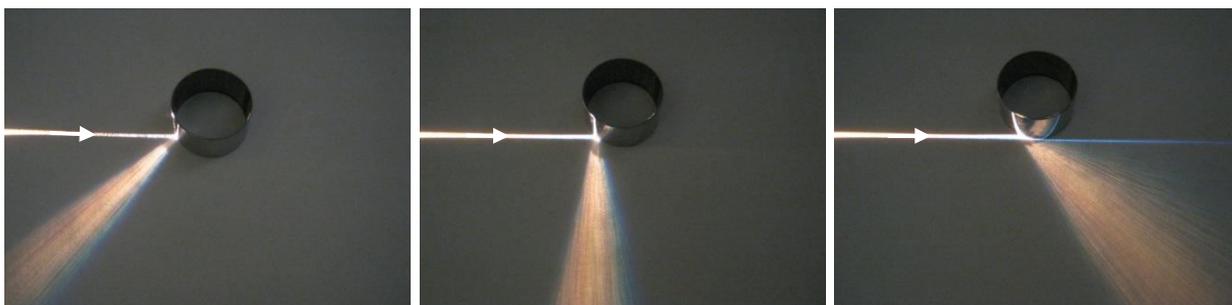


Рисунок 29 – Отражение света от цилиндрического зеркала

Если «под руками» нет никаких блестящих цилиндрических предметов, то опять обратимся к ресурсам DVD – сделаем из плоского зеркала цилиндрическое (**функциональный производный ресурс**). Для этого надо подержать пинцетом фрагмент DVD в струе горячего воздуха, например, над газовой плитой – пластмасса размягчится и под действием силы тяжести сама примет форму близкую к цилиндрической (рисунок 30). Однако у такого зеркала есть **недостаток**: если лучи света падают на бóльшую часть зеркала, то от зеркала отражаются не только белые лучи, но и дифракционные спектры (рисунки 30 и 31), которые накладываются друг на друга в общей картине. Убрать лишние дифракционные спектры можно при помощи наклеивания на «ненужные» участки зеркала тёмной изоленты (рисунок 32).



Рисунок 30

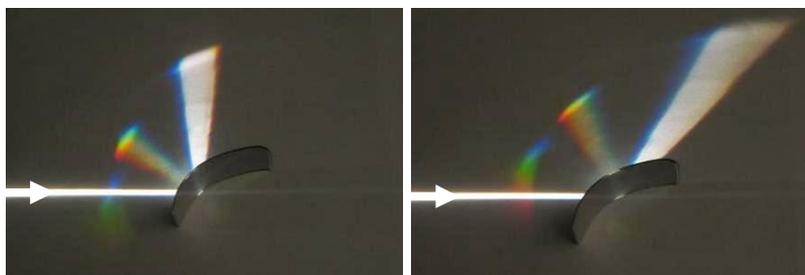


Рисунок 31

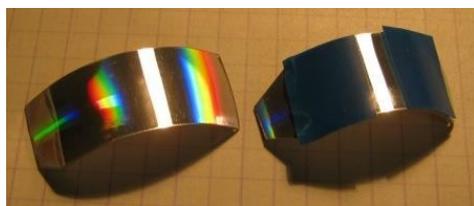
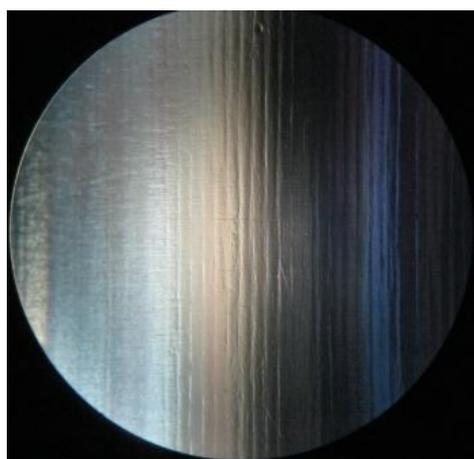
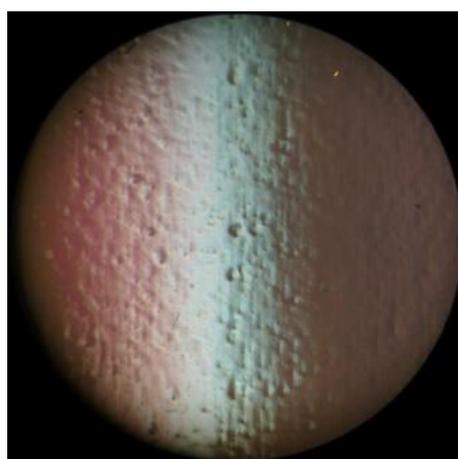


Рисунок 32 – «Ненужные» участки цилиндрического зеркала из DVD заклеены синей изолентой

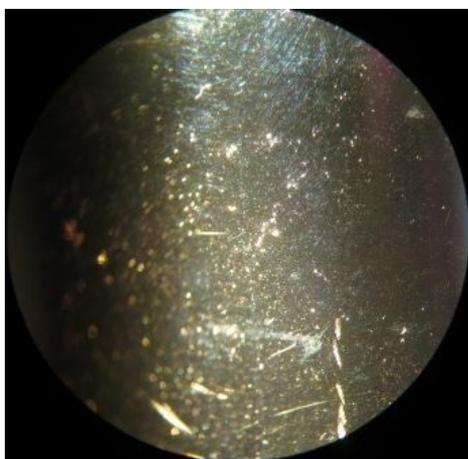
Ещё одним важным фактором, влияющим на качество изображения «картинки» дифракционного спектра, является качество поверхности цилиндрического зеркала. Например, на рисунке 29 в отражённых лучах видна некоторая неоднородность («ребристость») отражающей поверхности, которая приводит к «пятнистости» изображения спектра. Все микродефекты отражающей поверхности (отпечатки пальцев, царапины, ...) приводят к тёмным пятнам и полосам на изображении спектра. Поэтому поверхность цилиндрического зеркала должна быть достаточно гладкой, хотя (в крайнем случае) спектр может быть получен даже при отражении света от консервной банки. Дефекты отражающей поверхности хорошо видны в лупу (5^X-10^X) или в микроскоп (рисунок 33).



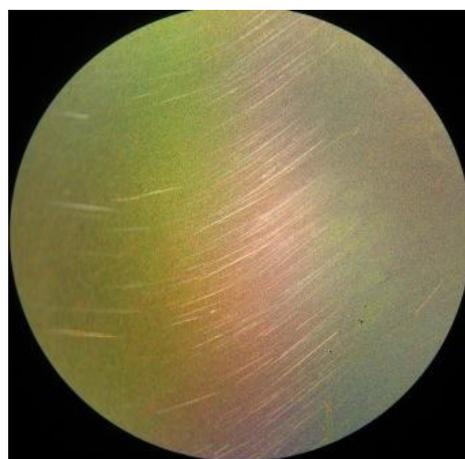
а) металлическая трубка



б) металлическая полоска



в) пластмассовая трубка



г) зеркало из DVD (царапины)

Рисунок 33 – Фотографии дефектов некоторых цилиндрических зеркал при увеличении в 16 раз

Из рисунка 33 видно, что меньше всего дефектов наблюдается на зеркале из DVD, однако его трудно изготовить и юстировать внутри спектроскопа. Кроме того, при изготовлении таких зеркал всегда приходится стирать с них пыль и отпечатки пальцев, а на пластмассовой поверхности при этом появляются царапины. Поэтому лучше для зеркала выбрать металлическую трубку с хорошей поверхностью.

При использовании цилиндрического зеркала можно получить **сверхэффект – самонаведение спектроскопа на источник света** (не надо точно нацеливать спектроскоп на источник света в горизонтальном направлении). Учитывая обратимость световых лучей в геометрической оптике, из рисунка 29 понятно, что где бы не находился яркий источник света в секторе наблюдения 180° всегда найдётся участок цилиндрической поверхности, который отразит свет в направлении дифракционной решетки. Но это свойство является не только преимуществом, но и недостатком. Если в секторе наблюдения спектроскопа будут находиться несколько ярких источников света, то все лучи от них попадут на дифракционную решетку. Поэтому желательно в разумных пределах ограничить сектор наблюдения цилиндрического зеркала при помощи ширины входной щели.

Заменим в спектроскопе, изображенном на рисунке 26, плоское зеркало на цилиндрическое, а также увеличим сектор обзора, расширив входную щель до 5–7 мм, и получим улучшенную конструкцию, изображённую на рисунке 34. Диаметр цилиндрического зеркала должен быть сравним с размерами спичечной коробки (2–5 см). Чем меньше диаметр зеркала, тем меньше будет яркость изображения (за счет более сильного рассеяния света).

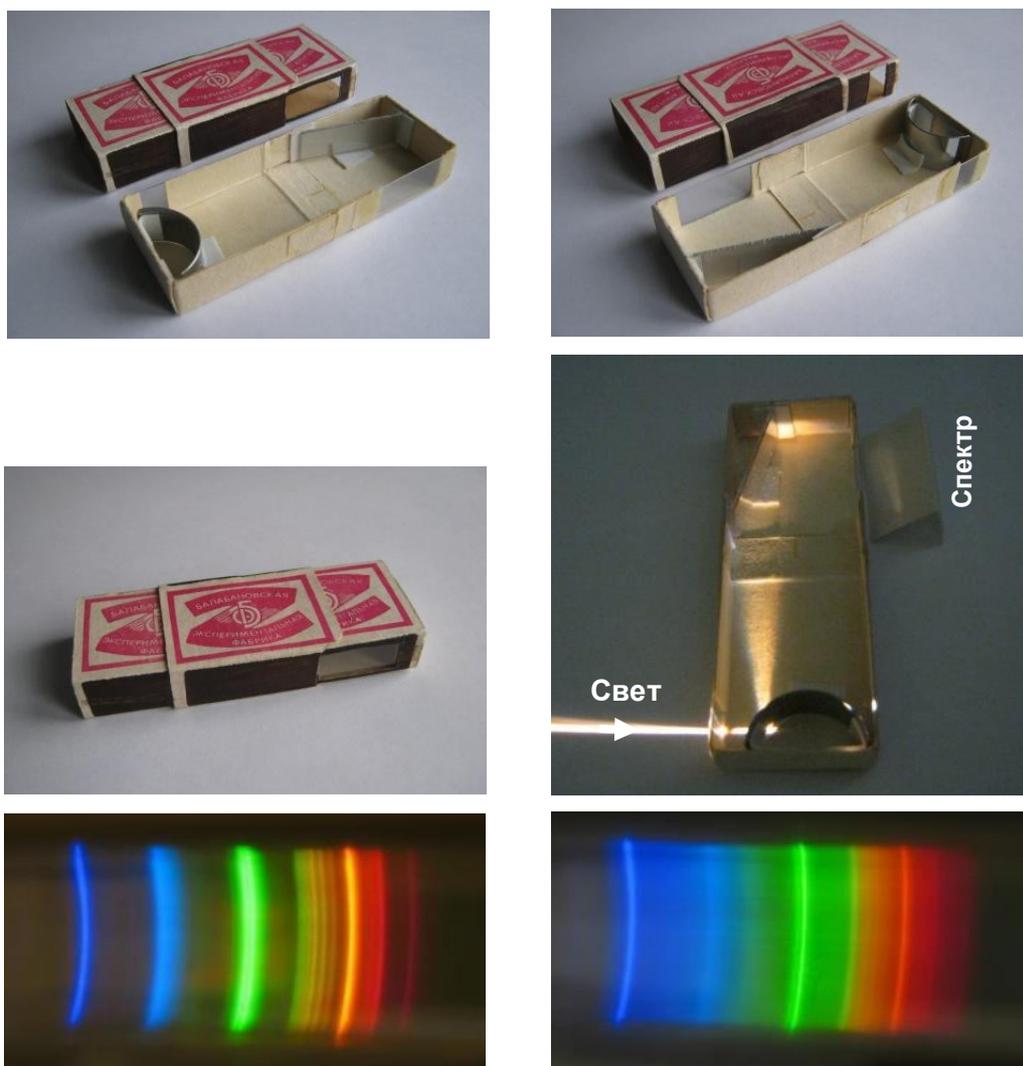


Рисунок 34 – Самонаводящийся спектроскоп с цилиндрическим зеркалом позволяет получать спектры с равномерной яркостью

Рассматривая конструкции спектроскопов, изображённых на рисунках 26 и 34, можно увидеть, что внутри их гораздо больше пустоты, чем вещества (**недостаток** – большие размеры). Применим **закон увеличения степени идеальности** (техническая система должна уменьшаться) и **закон развёртывания-свёртывания** (по пути миниатюризации). Размещаем все элементы оптической системы не в двух спичечных коробках, а в одной (рисунок 35).

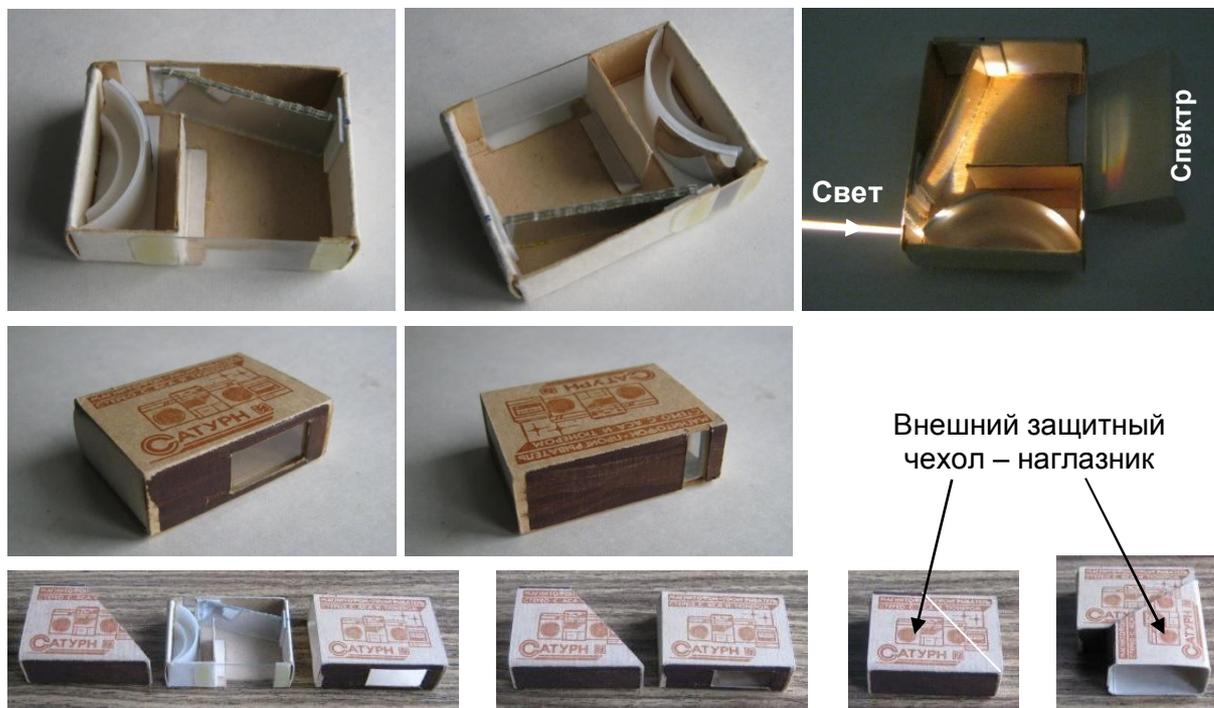
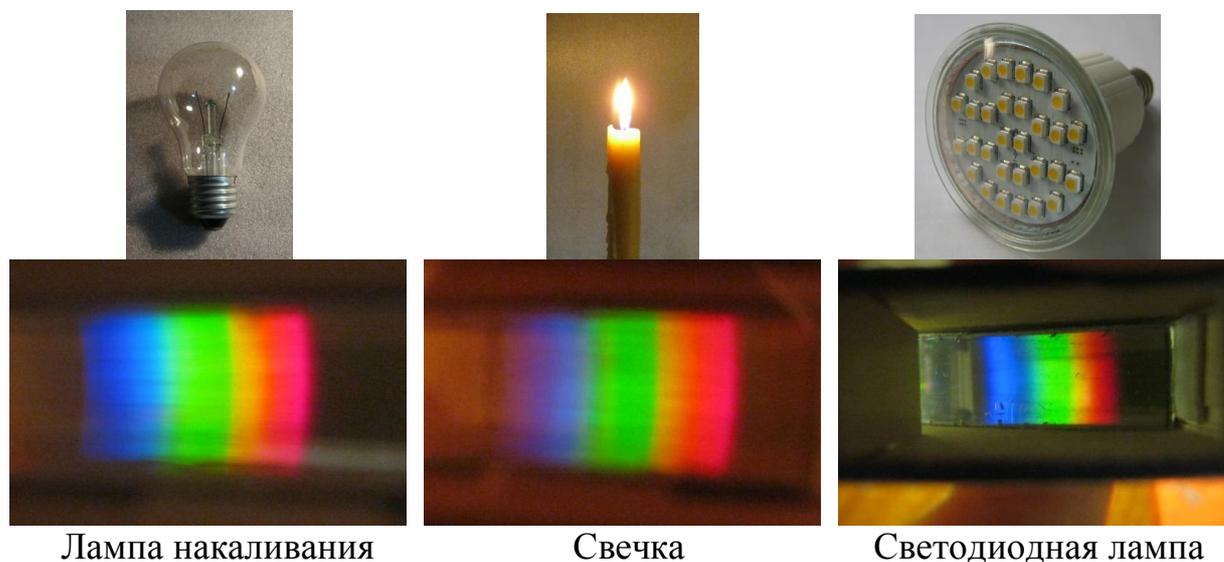


Рисунок 35 – Малогабаритный спектроскоп с цилиндрическим зеркалом

В данной конструкции функцию цилиндрического зеркала выполняет кусочек солнцезащитной плёнки. При помощи двухстороннего скотча на вспененной основе эта плёнка наклеена на кусок пластикового кольца от использованного канцелярского скотча. Кроме этих **надсистемных вещественно-полевых ресурсов**, при изготовлении спектроскопа используются **ресурсы вещества** самой спичечной коробки. Внутри данной конструкции необходим непрозрачный экран для устранения бликов и для предотвращения попадания света из входной щели напрямую в выходное окно. Этот экран изготавливается из куска картона боковой стенки на месте расположения выходного окна. Боковая стенка частично надрезается с двух сторон, загибается внутрь и приклеивается. В результате, в стенке коробки появляется пустое место для окна, а в центре коробки – экран. Для придания жесткости конструкции и предотвращения попадания внутрь пыли окна заклеены тонким пластиком (от бытовой упаковки). Чтобы при хранении и транспортировке пластик на окнах не царапался, из корпуса второй спичечной коробки изготовлен внешний защитный чехол, надевающийся сверху и закрывающий окна. Внешний защитный чехол выполняет ещё две функции: при наблюдении спектра он является светозащитным наглазником, а также удерживает глаз на оптимальном расстоянии от дифракционной решетки (6 см).

«Я исследую мир» при помощи спектроскопа

Имея прибор для исследований, теперь можно исследовать спектр различных доступных источников света (рисунок 36).



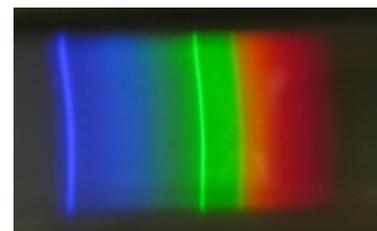
Аппарат ультрафиолетового облучения SAULE с ртутной лампой типа ДРТ-125.



Компактная люминесцентная лампа с линейчатым спектром.



Компактная люминесцентная лампа с улучшенной цветопередачей.



Настенный светильник с люминесцентной лампой дневного света с улучшенной цветопередачей (со светильника снят матовый плафон).

Рисунок 36 – «Домашние» источники света и их спектры

Прогнозирование развития самодельных дифракционных спектрометров из DVD

Зная изобретательские приёмы и законы развития технических систем можно прогнозировать дальнейшее совершенствование разработанных спектрометров.

Прогноз 1.

Преимущество спектрометра в одной спичечной коробке (рисунок 35) – малогабаритность: его удобно носить и хранить, но при наблюдениях спектра приходится закрывать один глаз, напрягая мышцы лица. Спектрометр в двух спичечных коробках лишен этого недостатка, но он в 2 раза больше. Как совместить преимущества двух конструкций в одной. Ответ очевиден – надо применить **принцип динамичности** и **закон повышения динамичности**. Пусть спектрометр будет маленьким при хранении и большим при измерении – он должен складываться-раскладываться или телескопически раздвигаться.

Прогноз 2.

Закон увеличения степени идеальности рекомендует увеличивать количество полезных функций. Если рядом с наблюдаемым спектром будет размещена полупрозрачная шкала длин волн, освещённая падающим светом, то спектрометр превратится в более точный прибор – **спектрометр**, который позволяет не только **рассматривать** спектр, но и **измерять** длину волны спектральных линий. В домашних условиях калибровать такую шкалу можно по любой люминесцентной лампе (с парами ртути), поскольку из рисунка 36 видно, что основные спектральные линии ртути сохраняются в люминесцентных лампах дневного света. А спектр ртути хорошо известен. (Возможно, шкала простого самодельного спектрометра будет немного неравномерная, поскольку лучи света падают на дифракционную решетку под разными углами, а не параллельно).

Прогноз 3.

Цилиндрическое входное выпуклое зеркало позволило получить для спектрометра свойство самонаведения на источник яркого света по одной координате. Применим ещё раз **принцип сфероидальности** и перейдём от цилиндрического зеркала к сферическому. **Получим свойство самонаведения по двум координатам**. Макет с металлическим шариком, изображённый на рисунке 37, подтвердил принципиальную возможность такого свойства, однако, высота и яркость спектра были малыми ввиду малого радиуса кривизны шарика. Поэтому предполагается, что лучше использовать зеркало в форме бочки или эллипсоида, как средней формы между цилиндром и шаром («домашними эллипсоидами») являются ложки (рисунок 38)). Но для продолжения работ в этом направлении необходимы дополнительные исследования, чтобы определить оптимальную кривизну и размеры бочкообразного зеркала.



Рисунок 37 – Макет спектрографа со сферическим выпуклым зеркалом



Рисунок 38 – Домашние предметы с формой близкой к эллипсоиду

ВЫВОДЫ

1. Проведены теоретические и экспериментальные исследования, в процессе которых **найжены оптимальные геометрические параметры**, влияющие на качество изображения спектра:

- **чтобы спектр был широким**, на отражательную дифракционную решетку должен падать скользкий луч (с углом падения 70° – 85°) по направлению от центра DVD к его краю (при этом спектр наблюдается приблизительно в направлении перпендикулярном падающему лучу);

- **чтобы спектр был высоким**, глаз наблюдателя должен находиться на оптимальном расстоянии (около 6 см) от поверхности DVD;

- **чтобы спектр был одинаковой яркости**, вся поверхность дифракционной решетки должна быть освещена;

- **чтобы спектрограф обладал свойством самонаведения на источник света**, необходимо использовать вместо входной щели цилиндрическое или бочкообразное выпуклое зеркало.

2. Для получения дифракционной картины высокого качества необходимо выбрать лучший для этого DVD, а также иметь цилиндрическое зеркало с минимальными дефектами на поверхности.

3. Проведённые исследования были направлены, в основном, на совершенствование спектрографов с отражательными дифракционными решетками, однако, высказанные в данной работе рекомендации пригодятся и разработчикам спектрографов с прозрачными дифракционными решетками из DVD. Например, можно установить после щели рассеивающую (цилиндрическую) линзу для освещения всей дифракционной решетки (при этом уменьшаются размеры спектрографа).

4. *Изготовлено 5 конструкций* карманных вариантов спектрографов, имеющих преимущества перед известными из Интернета.

5. *Разработана новая оптическая схема* отражательного дифракционного спектрографа из DVD, в которой вместо входной щели используется

цилиндрическое или бочкообразное выпуклое зеркало с непрозрачными экранами, ограничивающими сектор наблюдения. Эта ранее неизвестная схема имеет два преимущества: 1) равномерная яркость изображения спектра; 2) самонаведение на источник света. Согласно классификации уровней изобретений, принятой в ТРИЗ, это **изобретение 3-го уровня** (полностью меняется один из элементов технической системы).

6. **Получен патент** на полезную модель спектроскопа с цилиндрическим зеркалом и дифракционной решеткой из DVD.

7. **Сфотографированы спектры** доступных источников света. Установлено, что среди энергосберегающих ламп лучший спектр (близкий к непрерывному) имеют светодиодные лампы.

8. Данная работа имеет **практическую значимость**: спектроскоп в спичечной коробке можно всегда принести в магазин электротоваров и купить для освещения квартиры энергосберегающие лампы со спектром, близким к естественному.

9. Данная работа имеет **педагогическую значимость**: конструкторское задание по изготовлению (и совершенствованию) подобных простых спектроскопов можно давать школьникам в качестве домашнего задания при изучении геометрической и волновой оптики, а также давать задание по наблюдению и фотографированию спектров (на фотокамеру мобильного телефона).