

Министерство науки и высшего образования РФ  
Московский государственный университет геодезии и картографии  
(МИИГАиК)  
Кафедра проектирование оптических приборов

Реферат

По дисциплине «Теория точности средств измерений»

Тема реферата:  
«Контроль и методы измерения качества оптических покрытий»

Выполнил:

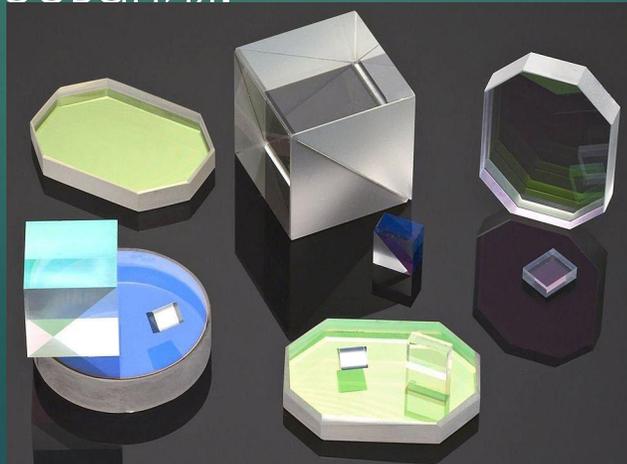
Студент ФОИСТ ОПТ-1м Ефимов Павел Дмитриевич

Принял:

Проф., К.т.н. Парвулюсов Юрий Борисович

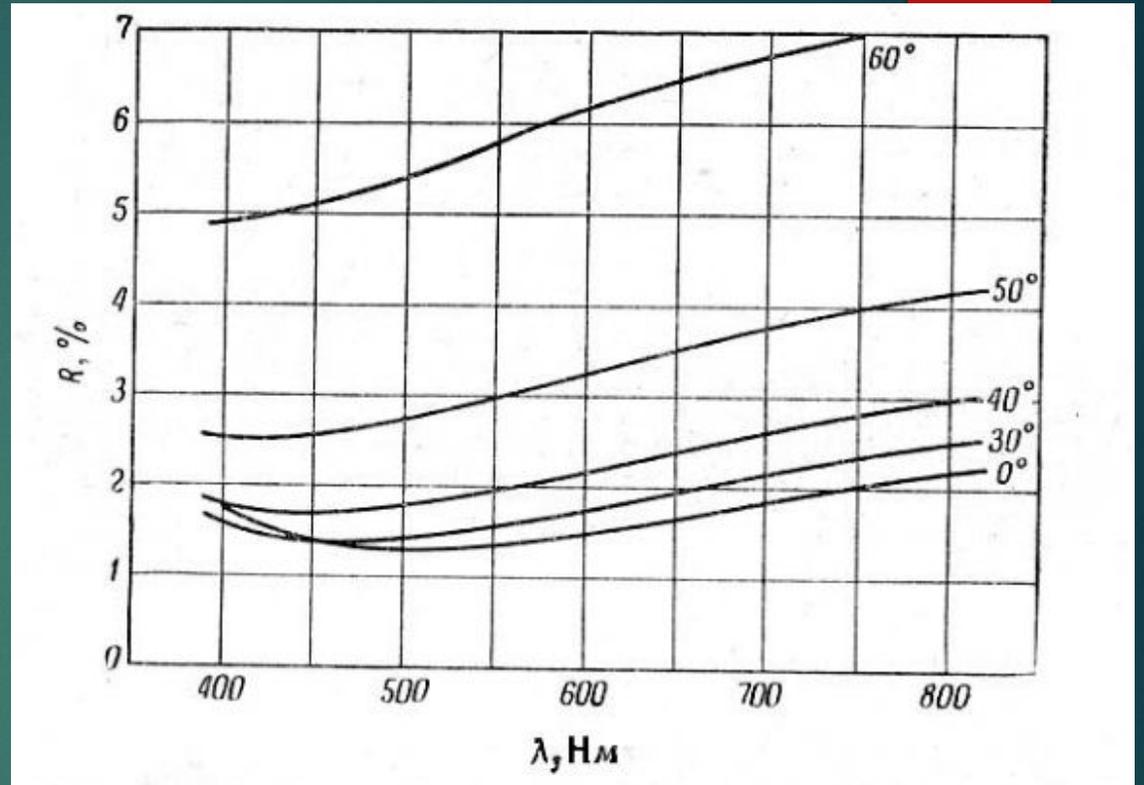
# ВВЕДЕНИЕ

- ▶ Современные оптические приборы и оптико-электронные приборы содержат существенный ряд оптических элементов, при этом каждый из них имеет многослойные оптические покрытия;
- ▶ Существует большое количество покрытий с разным функционалом: просветляющие (антибликовые покрытия), зеркальные, поляризующие, спектро- и светоделительные покрытия;
- ▶ С учетом растущих требованиям к готовым изделиям к покрытиям предъявляются высокие оптические и функциональные требования.



# Оптические характеристики покрытий

- ▶ Стандартными параметрами оценки оптических характеристик покрытий являются величины коэффициентов пропускания и абсолютного отражения, измеренные в широком диапазоне углов измерений.
- ▶ Кроме этого, данные параметры пропускания и отражения должны измеряться в широком спектральном диапазоне
- ▶ Процедура оценки качества покрытий должна соответствовать реальным условиям эксплуатации покрытий и обладать метрологическим обеспечением.



Спектральная зависимость отражения  $R$  однослойного покрытия на стекле для углов падения  $0$ ,  $30$ ,  $40$ ,  $50$  и  $60^\circ$

- При отсутствии поглощения основными оптическими характеристиками тонкой пленки служат показатель преломления и толщина пленки (геометрическая или оптическая);
- Свойства тонкой пленки как оптической системы зависят от свойств окружающей среды, от характеристик источника и приемника излучения;
- Если толщина пленки соизмерима с длиной волны излучения, то наблюдаются в ней явления интерференции и поляризации света и таким образом это даёт возможность использовать для определения указанных характеристик;
- При разработке методов расчета и контроля оптических постоянных пленок основой служит модель идеальной пленки, аналогичной плоскопараллельной пластинке из однородного поглощающего вещества. Толщина ее мала по сравнению с окружающими средами;
- В зависимости от условий нанесения и состояний исходного вещества структура пленок может быть различной.

- ▶ Экспериментально полученные тонкие пленки в той или иной степени не однородны, что необходимо учитывать при определении оптических постоянных, иначе это может служить причиной неправильного истолкования полученных результатов;
- ▶ Наиболее объективное исследование требует параллельного применения различных методов;
- ▶ Возможность создания разнообразных многослойных систем обеспечивает наличием не только пленкообразующих веществ, но и надёжных методов контроля, что является не менее важным условием;
- ▶ Прежде чем переходить к методике и анализу оптических постоянных покрытий рассмотрим особенности применения спектрофотометров.

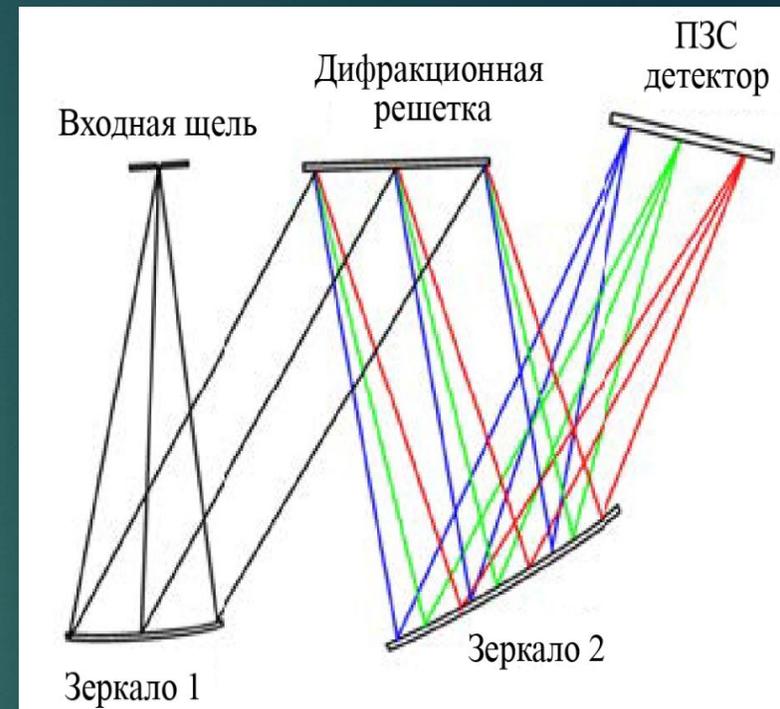
## Особенности применения спектрофотометров

Большая часть отечественных и импортных спектрофотометров построены по двухлучевой схеме монохроматора, которые имеют следующие достоинства:

- За счёт малости ширины раскрытия светового пучка имеют низкие уровни рассеянного света и как следствие хорошее соотношение сигнал/шум прибора;
- Высокую точность измерения пропускания и установки длины волны.

К недостаткам можно отнести наличие ряда некоторых конструктивных особенностей, которые вызывают ограничение по их измерительным способностям и как следствие приводят к большим временным затратам на их измерения.

Применение громоздких приставок помещаемых в рабочем измерительном канале спектрофотометра не дает возможности измерять спектральные характеристики в конкретной рабочей зоне оптической детали и усложняет работу оператора для проведения измерений.



Оптическая схема  
монохроматора – Черни  
Тернера

- ▶ Учитывая конструктивные ограничения существующих приборов и объективные задачи оптиков по измерениям оптических деталей с покрытиями, были разработаны серия универсальных и многофункциональных спектрофотометров PHOTON RT от компании ООО «ЭссентОптикс»
- ▶ В зависимости от поверхности измеряемой детали были разработаны две линейки таких приборов:
  - Сканирующий спектрофотометр PHOTON RT Essentoptics предназначенный для измерения спектральных характеристик отражения, пропускания и оптической плотности плоских оптических деталей и покрытий на них в поляризованном свете;
  - Спектрофотометр LINZA 150 для измерения оптических характеристик линз и объективов. Он применяется для получения спектральных характеристик пропускания и зеркального отражения на сферических и цилиндрических поверхностях



# Назначение и область применения спектрофотометра PHOTON RT

Спектрофотометр имеет следующие назначения:

- Проведения всесторонних качественных измерений оптических деталей с покрытиями в УФ, видимом и ИК диапазонах;
- Гарантия проведения точных измерений пропускания и абсолютного отражения в поляризованном свете и широком диапазоне углов в полностью автоматическом режиме;
- Возможность измерять как однослойные, так и многослойные покрытия;
- Выполнение спектрального анализа по результатам полученных спектральных характеристик;
- Проведение глубоких исследований и разработок новейших оптических материалов.

Область применения – область промышленности, в которых используется фотометрические методы исследования тонких пленок (оптическое приборостроение);

# Общие метрологические характеристики для всех исполнений спектрофотометров RT photon

- ▶ Спектрофотометр может поставляться в шести конфигурациях в зависимости от требований заказчика.

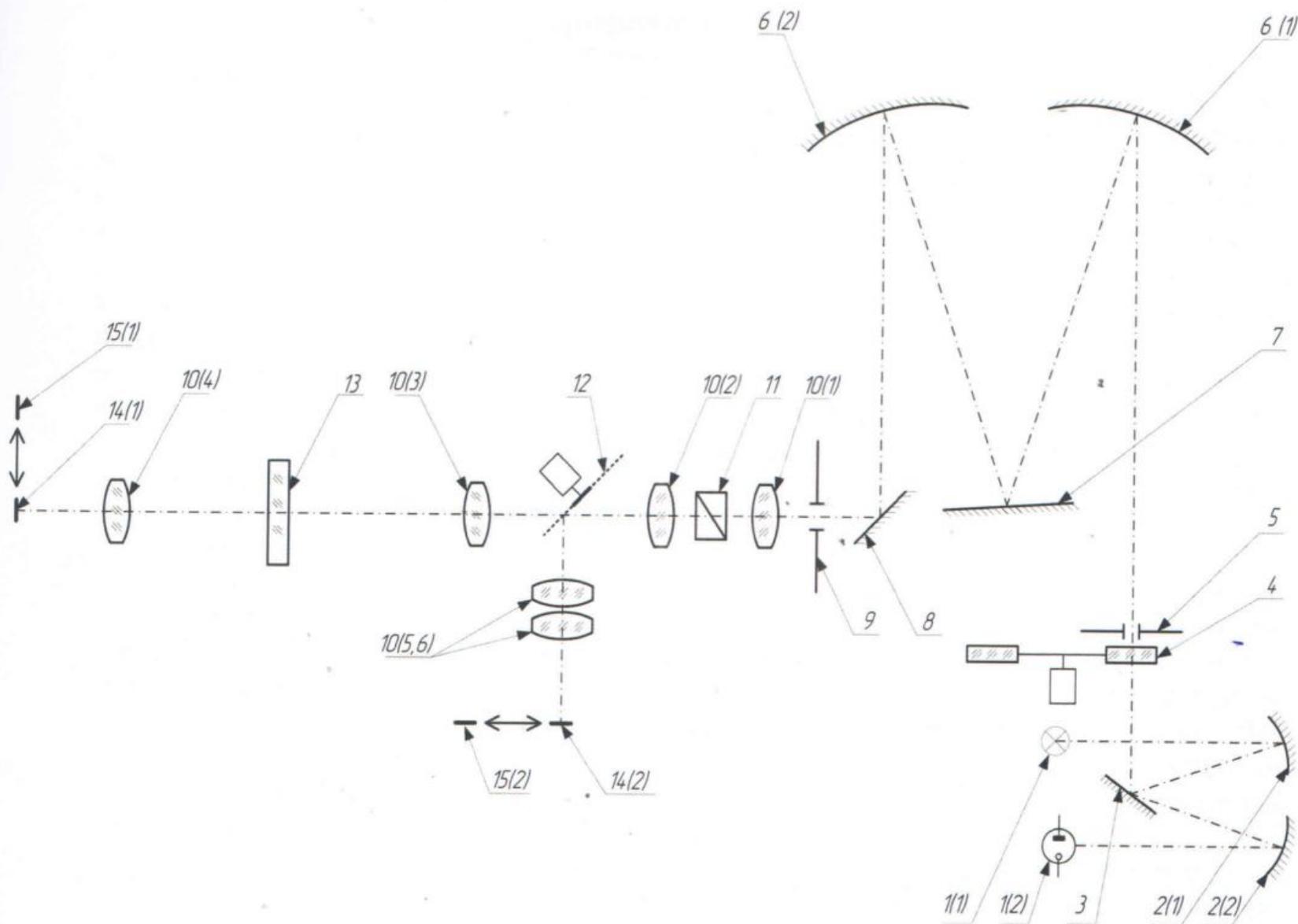
Наименование характеристики	Значение					
	Исполнитель 1	Исполнитель 2	Исполнитель 3	Исполнитель 4	Исполнитель 5	Исполнитель 6
Спектральный диапазон, нм	от 185 до 1700	от 185 до 3500	от 185 до 5200	от 380 до 1700	от 380 до 3500	от 380 до 5200

Наименование характеристики	Значение
Диапазон измерений спектрального коэффициента направленного пропускания, %	От 0 до 100
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений спектрального коэффициента направленного пропускания, %	±0,50
Предел допускаемого относительного среднего квадратичного отклонения случайной составляющей погрешности измерений спектрального коэффициента направленного пропускания, %	2,00
Пределы допускаемой абсолютной погрешности шкалы длин волн спектрофотометра, нм	±1,00
Предел допускаемого среднего квадратичного отклонения случайно составляющей погрешности установки длины волны, нм	0,24
Дрейф показаний спектрофотометра за 1 ч. Непрерывной работы ( в диапазоне спектра от 400 до 980 нм) при измерении спектрального коэффициента направленного пропускания, %, не более	±0,01

Технические характеристики, метрологические критерии.  
Сравнительная характеристика средств измерений – RT Photon (в одном исполнении), Альтаир КФК-300 и Linza 150

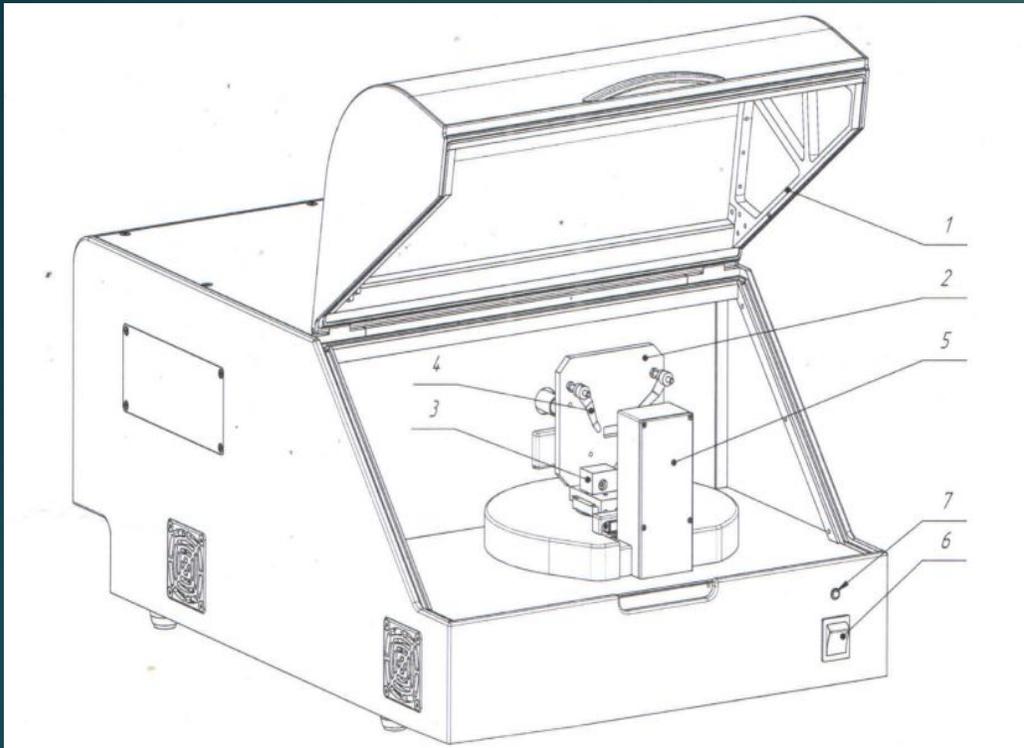
Наименование характеристики	Альтаир КФК-300	RT Photon	Linza 150
Диапазон длин волн, нм	325-1000	380-3500	380-1700
Спектральная ширина щели, нм (предельное спектральное разрешение)	4,0	0,3 для =350-990 нм; 0,6 для =350-990 нм; 1,2 для =1650-2450 нм; 2,4 для =2450-5200 нм.	2,0
Пределы допускаемой абсолютной погрешности установки длины волны, нм	±2,0	+/-0,12 для =185-350 нм; +/-0,24 для =350-990 нм; +/-0,48 для =990-1650 нм. +/-0,48 для =1650-2450 нм +/-0,96 для =2450-5200 нм	±0,5
Диапазон измерений спектрального коэффициента направленного пропускания, %T	0...100	0...100	0...100
Диапазон измерения оптической плотности, D	0...3,0	0...5,2	0...5,2
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерения спектрального коэффициента направленного пропускания, %	±0,5	±0,5	±0,05
Уровень рассеянного света, %	0,3	<0,1	<0,1
Источники излучения (внутри прибора)	Галогенная лампа накаливания	Лампа галогенная, лампа калибровочная HgAr, лампа Дейтериевая, ИК лампа	Лампа галогенная, Лампа Дейтериевая, калибровочная HgAr

# Оптическая схема спектрофотометра



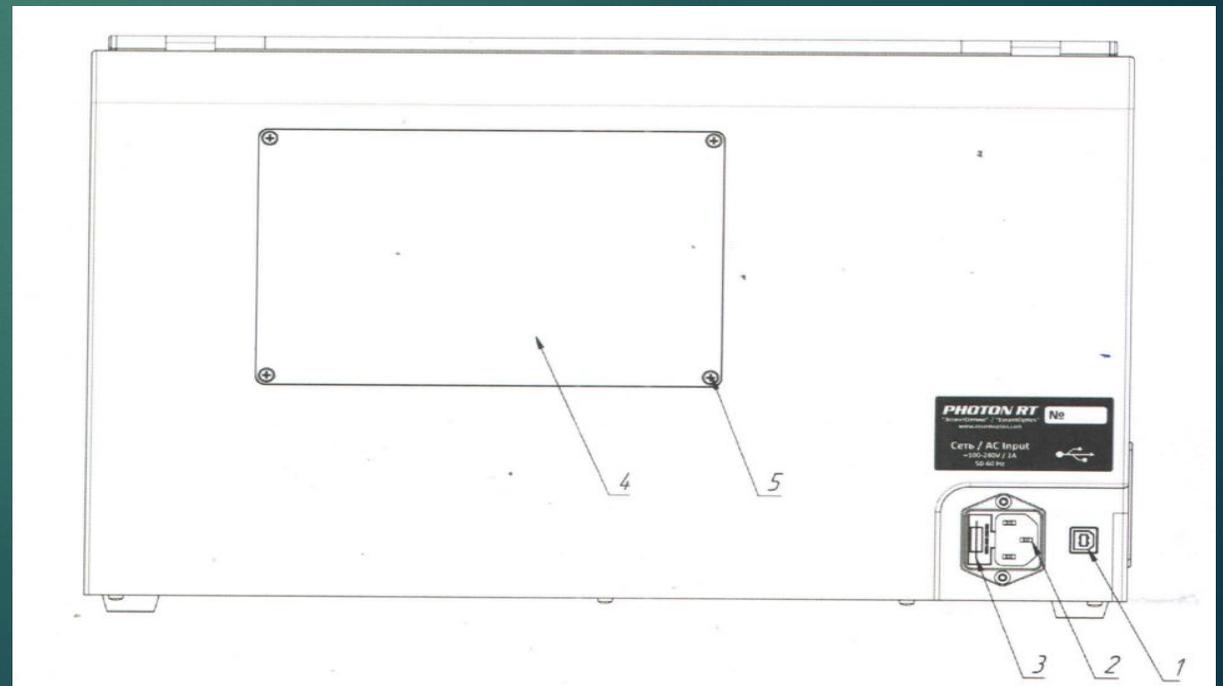
- 1(1) – Лампа галогенная;
- 1(2) – Лампа дейтериевая;
- 2(1), 2(2) – Зеркало сферическое;
- 3 – Зеркало плоское;
- 4 – Фильтр;
- 5 – Входная щель
- 6(1), 6(2) – Зеркало сферическое
- 7 – Дифракционная решетка;
- 8 – Зеркало плоское;
- 9 – Выходная щель
- 10(1), 10(2), 10(3), 10(4), 10(5,6) Линза;
- 11 – Поляризатор;
- 12 – Модуляторный зеркальный
- 13 – Измеряемый образец;
- 14(1), 14(2) – приемник UV-VIS;
- 15(1), 15(2) приемник IR.

# Устройство спектрофотометра



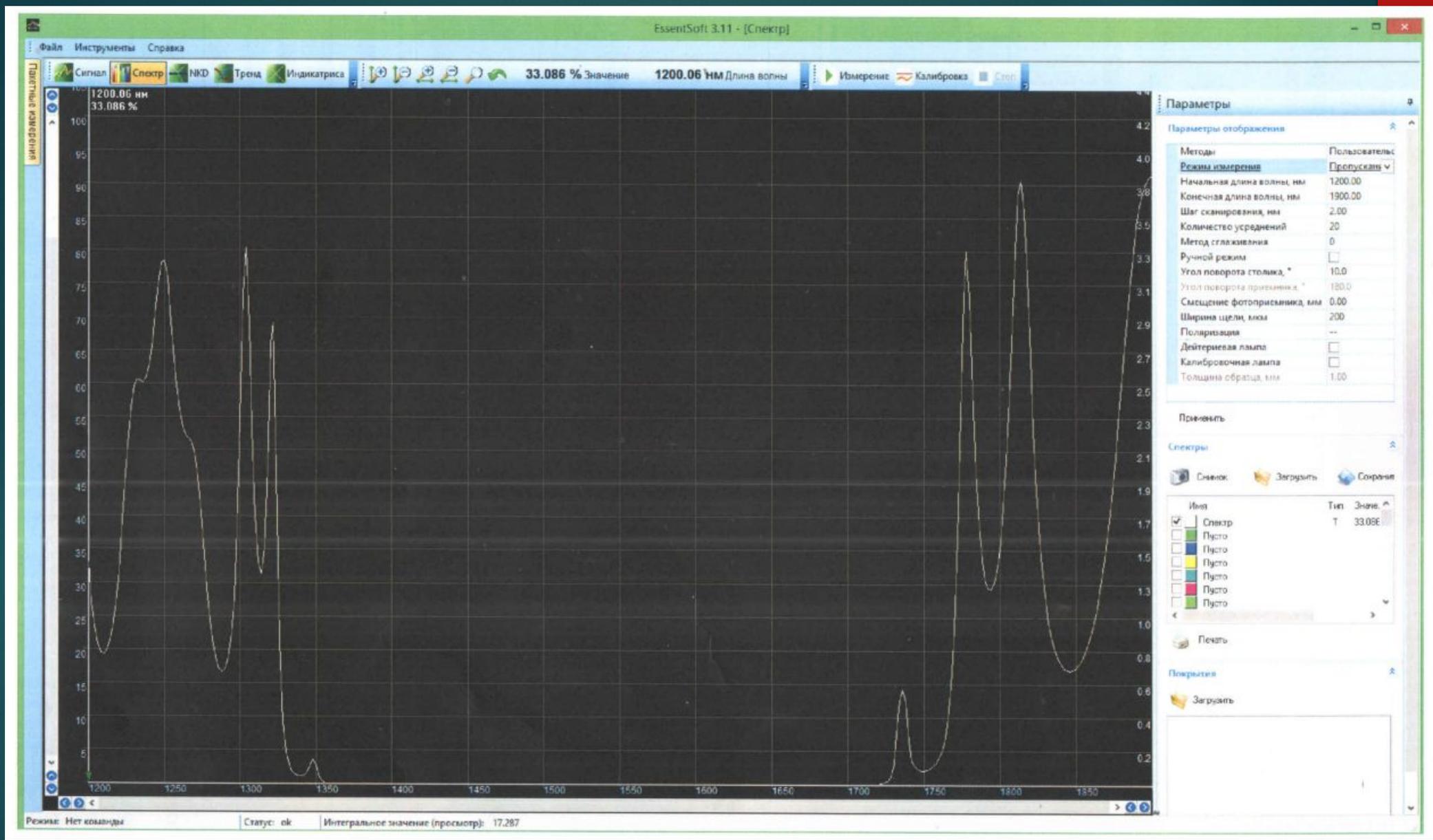
1 – Крышка измерительного отсека; 2 – Столик; 3 – Подставка; 4 – Прижимы; 5 – Узел фотоприёмника; 6 – Выключатель питания; 7 – Светодиод индикации, свидетельствующий о состоянии прибора;

1 – разъём USB; 2 – сетевой разъём; 3 – Предохранитель; 4 – Крышка; 5 – Винты.



# Программное обеспечение спектрофотометра

- ▶ Программное обеспечение, входящее в состав спектрофотометра, предназначено для управления спектрофотометром, настройками режимов измерения, управления приводами, а также для обеспечения функционирования интерфейса и обработки информации, полученной в процессе измерений.
- ▶ Метрологическая значимая часть ПО размещается в энергозависимой микросхеме памяти в аппаратной части спектрофотометра, запись которой осуществляется в процессе производства. Доступ в микросхеме памяти исключен конструкцией аппаратной части спектрофотометра, также отсутствует доступ к микросхеме памяти из ПО управления спектрофотометром.



Вид интерфейса программы «PhotonSoft»

## Принцип действия спектрофотометра

Принцип действия спектрофотометра основан на измерении отношении двух световых потоков, проходящих через исследуемый образец и опорный канал.

Далее эти световые потоки преобразуются фотоприёмником в электрические сигналы  $I$  и  $I_0$ , пропорциональные световым потокам, прошедшим через исследуемый образец и опорный канал соответственно.

Кроме того, при расчёте параметров учитывается интенсивность сигнала от неосвещенного фотоприемника  $I_T$ . Коэффициент пропускания определяется по следующей формуле:

$$T = \frac{I - I_0}{I_0 - I_T}$$

Оптическая плотность  $D$  рассчитывается по формуле:

$$D = \lg \frac{I_0 - I_T}{I - I_T}$$

# Измерение спектральных характеристик оптических покрытий на спектрофотометре Photon RT

## Измерение коэффициента пропускания

Измерение коэффициента пропускания осуществляется поэтапно в следующей последовательности с использованием дополнительного ПО «PhotonSoft»:

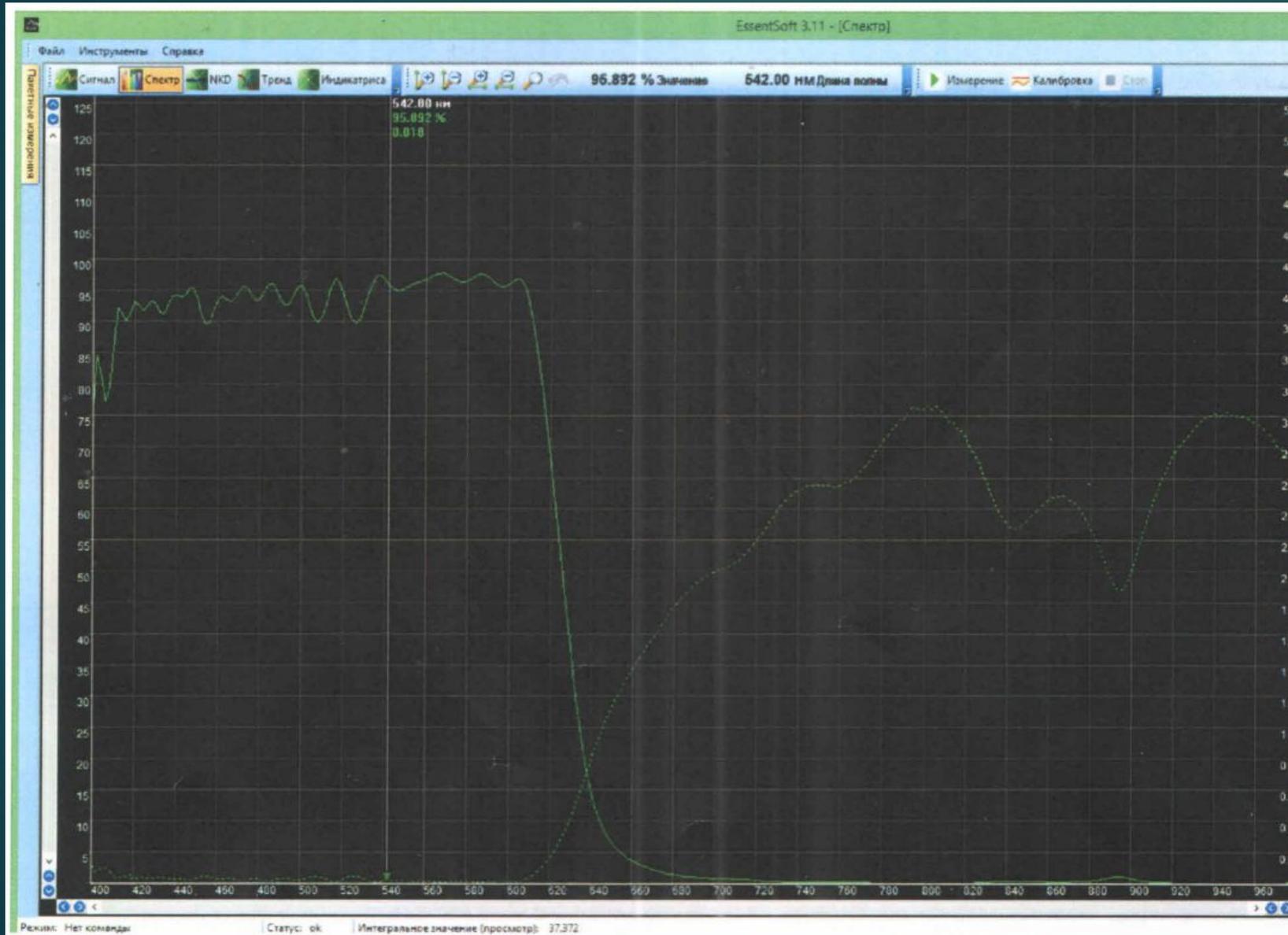
- Включить спектрофотометр;
- Запустить программу «PhotonSoft»;
- Дождаться прогрева спектрофотометра не менее 30 минут.

В окне панели режима измерения ввести необходимые параметры:

- 1) диапазон сканирования;
- 2) шаг сканирования;
- 3) количество усреднений;
- 4) метод сглаживания;
- 5) поляризация.

- Убедиться, что в оптическом канале в измерительном отсеке нет никаких предметов;
- Нажать кнопку применить;
- Нажать кнопку «Калибровка» на экране панели инструментов, после окончания должна отобразиться спектральная кривая, со значением спектра пропускания 100%; Установить на поворотный столик измеряемый образец.
- Задать угол поворота столика.
- Запустить процесс измерения нажатием кнопки «Измерение». По завершению процесса, на экране отобразится график спектра пропускания образца и оптической плотности.

# График спектра пропускания и оптической плотности



На рисунке представлен пример спектра пропускания и оптической плотности. Шкала пропускания находится слева, шкала оптической плотности находится справа. График оптической плотности можно отображать на интерфейсе или скрывать.

# Измерение спектра абсолютного зеркального отражения и поглощения

Измерение спектра абсолютного зеркального отражения и поглощения образца проводится в той же последовательности при правильном расположении измерительного столика с закрепленной оптической деталью и введением необходимых параметров в окне измерений программы «PhotonSoft»

Для более корректного измерения спектра отражения образца (исключением попадания в объектив измерительного канала луча, отраженного от задней поверхности образца) необходимо применять образцы толщиной не менее 40 мм, либо применять образец в виде клина (угол клина  $5^\circ$ ).

В режиме измерения поглощения необходимо учитывать толщину образца, поэтому в параметре окна измерений в графе «Толщина образца, мм» вводится соответствующее значение.

По завершению результатов измерений спектра отражения образца на экране отобразится спектр удельного показателя ослабления DA, который характеризует величину полных внутренних потерь сигнала на поглощении и рассеяния в измеряемом образце.

# Методика определения оптических характеристик на базе спектрофотометра RT Photon

- ▶ Одним из наиболее простых методов реализуемых на основе спектрофотометров является определение оптических характеристик непоглощающих материалов на поверхности прозрачной подложки, который основан на измерение спектральных значений коэффициента отражения  $R_\lambda$  для ряда длин волн  $\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_n$  выбранного участка спектра;
- ▶ Разработанная методика включает последовательное измерение отражения от покрытия под различными углами и последующий их расчёт;
- ▶ Модуль автоматического измерения внедренный в программное обеспечения спектрофотометра позволяет по заданной методике выполнять расчёт дисперсии показателя преломления и толщины одиночного слоя.
- ▶ Полученные измерения дисперсии показателя преломления могут быть использовать в оптических расчётах.
- ▶ Рассмотрим подробно реализацию данного метода с использованием программы «PhotonSoft» и последовательность выполняемых операций.

# Измерение $n$ , $k$ , $d$

Последовательность выполняемых операций выглядит следующим образом:

На панели инструментов интерфейса программы переходим во вкладку «NKD» предназначенная для определения оптических параметров плёнообразующего материала на известной подложки.

Вычисления оптических параметров плёнообразующего материала производится на основе измерений отражения от подложки с покрытием в поляризованном свете –  $R_p$ ,  $R_s$  для нескольких углов падения (от трёх до восьми).

В качестве подложки применяется клин (угол клина не менее  $5^\circ$ ), для устранения отражения от второй стороны. Предварительная калибровка должна быть выполнена в заданном диапазоне спектра в режиме поляризации, при этом увеличив ширину щели в 1,5 раза (для лучшего соотношения сигнал/шум).

- Включить спектрофотометр
- Запустить программу «PhotonSoft»
- Выполнить прогрев прибора (30 минут)
- Выбрать измерения коэффициента пропускания;
- Задать необходимые параметры измерения: диапазон сканирования, шаг сканирования, количества усреднений, метод сглаживания, количество усреднений, поляризация – PS, ширина щели;
- Выполнить калибровку средства измерения по установленным параметрам (калибровка будет производиться в двух режимах поляризации).

- Произвести установку измеряемого образца на поворотный столик;
- Открыть окно «NKD»;
- Задать значения в полях в виде границ:

Поглощение

Параметр n: от

Параметр n: до

Параметр k, от

Параметр k, до

Параметр d, нм:

Параметр d, нм:

Материал Подложки

Точность

- Нажать кнопку «Измерения»
- Дождаться окончания процедуры измерения и вычисления толщины пленки, графика дисперсии показателя преломления и графика коэффициента поглощения.
- Для корректного расчёта показателя преломления необходимо задать границы n таким образом, чтобы расчётные значения находились внутри границ. Таким же образом надо задавать границы толщины d. Не рекомендуется производить расчёт с учетом поглощения,  $k < 0,01$

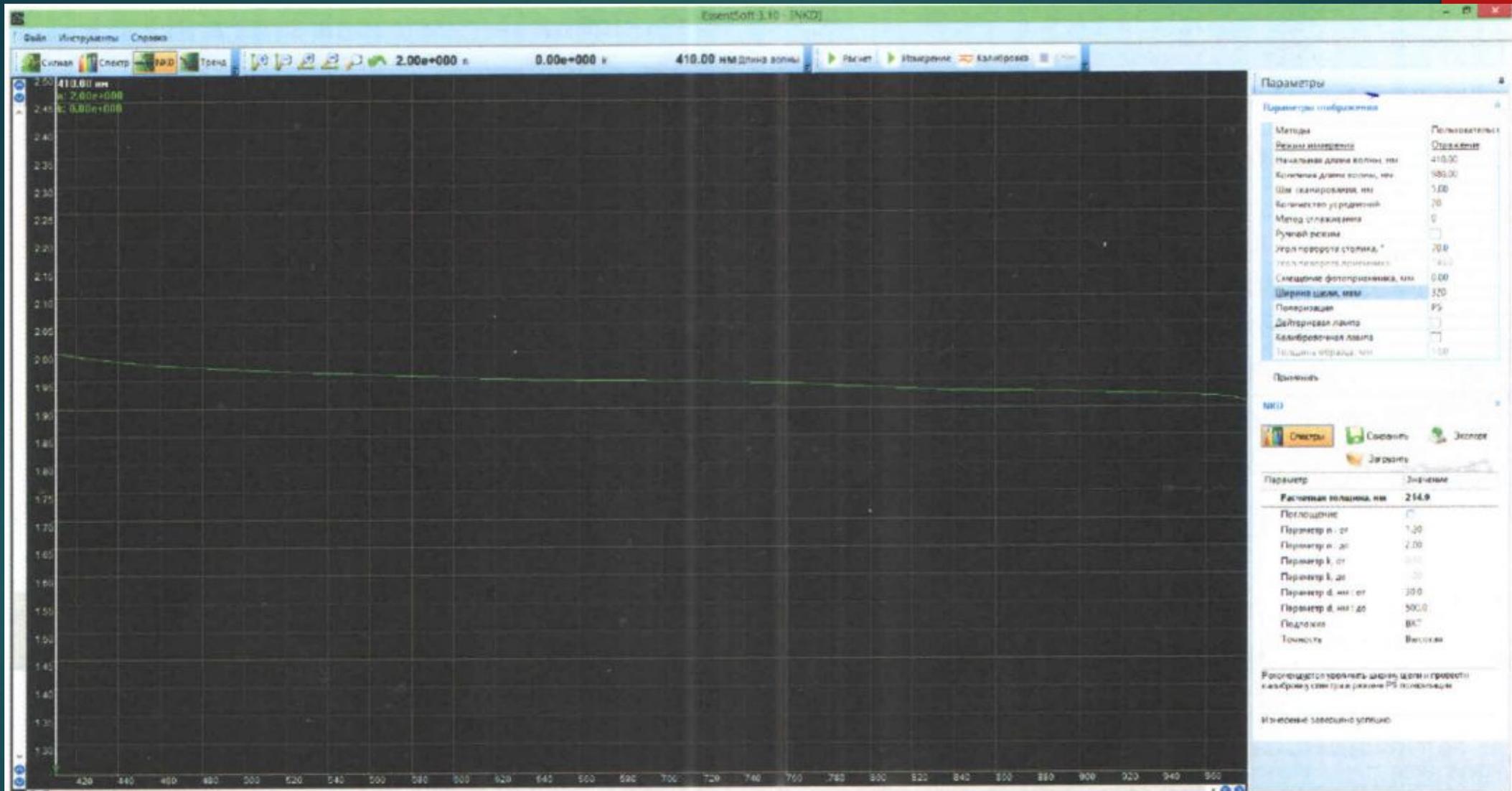


График показателя преломления покрытия  $ZrO_2$  в диапазоне спектра 410-980 нм, расчётная толщина покрытия 214,9 нм.

# Заключение

- ▶ Рассмотренный метод исследования качества тонкообразующих материалов на базе спектрофотометров широко используется в различных областях науки и техники – в частности в авиации, космонавтики и оптических изделий военной техники;
- ▶ В данной работе было рассмотрено, что основными важными характеристиками и параметрами определяющие качества тонких покрытий является толщина покрытий, дисперсия показателя преломления и отражения в широком диапазоне длин волн;
- ▶ Контроль качества пленок определяется прежде всего их толщиной для моноструктур и многослойных материалов и является критически важным для попадания в заданные оптические характеристики при их изготовлении;
- ▶ Разработанная методика вычисления однослойных структур для определения дисперсии показателя преломления, толщины пленки с учетом коэффициента поглощения может быть использована в оптических расчетах и таким образом можно достичь наибольшего совпадения расчётных и фактических спектров при промышленном нанесении уже многослойных структур.
- ▶ PHOTON RT отлично себя зарекомендовал, как многофункциональный, удобный и универсальный прибор, позволяющий решать сложные задачи и проводить высокоточные измерения при исследовании однослойных непоглощающих покрытий, а также многослойных материалов в широком диапазоне длин волн.

Спасибо за внимание!