



## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ В УФ-, ВИДИМОМ И ИК-ДИАПАЗОНАХ

Т. С. Лисовский, ООО "ЭссентОптикс", Минск, Беларусь, [lisouski@essentoptics.com](mailto:lisouski@essentoptics.com)

Представлены результаты новейших разработок компании ООО "ЭссентОптикс" в области метрологического обеспечения измерений оптических характеристик тонкопленочных покрытий в широком диапазоне электромагнитного спектра от 185 до 5200 нм. Обоснована необходимость всестороннего и глубокого анализа спектральных характеристик покрытий. Показаны технические решения для проведения автоматических измерений коэффициентов пропускания и абсолютного зеркального отражения плоскопараллельных деталей и призм. Рассмотрены случаи, включающие не только автоматизацию измерений под различными углами падающего излучения, но и учет отдельных поляризационных компонентов излучения. Представлены результаты реальных измерений покрытий с предельными характеристиками. Например, измерения абсолютного зеркального отражения на уровне 99,95% на длине волны 1064 нм.

Современные оптические и оптико-электронные приборы содержат существенный ряд оптических элементов, при этом практически каждый из них имеет многослойное тонкопленочное покрытие. Набор покрытий чрезвычайно широк: просветляющие, фильтрующие, зеркальные, поляризующие, спектро- и светоделительные покрытия. С учетом растущих требований к конечным характеристикам готовых оптических приборов и к самим покрытиям предъявляются тоже высокие оптические и функциональные требования. Например, стандартными параметрами оценки оптических характеристик покрытий являются величины коэффициентов пропускания и абсолютного зеркального отражения, включая эти параметры для различных компонент поляризации падающего в широком диапазоне углов излучения. Кроме этого, данные параметры пропускания и отражения должны измеряться в широком спектральном диапазоне. Таким образом, процедуры оценки качества покрытий должны соответствовать реальным условиям эксплуатации покрытий и обладать метрологическим обеспечением.

Традиционно в оптической промышленности используются аналитические спектрофотометры отечественного и импортного производства. Эти приборы построены по двухлучевой схеме и обладают рядом достоинств: демонстрируют в большинстве случаев рекордно низкие уровни рассеянного света, высокую точность измерения пропуска-

ния и установки длины волны. Но при этом они имеют ряд конструктивных особенностей, которые ограничивают их измерительные возможности и приводят к большим временным затратам на измерения. В силу того, что большинство коммерческих спектрофотометров предназначено преимущественно для измерения коэффициента пропускания жидких образцов в кюветках при падении излучения по нормали к ее поверхности, все иные измерения в обязательном порядке требуют использования дополнительных, часто дорогих и громоздких, приставок. В таких приборах нет возможности проводить измерения коэффициентов пропускания и отражения в одной и той же локальной поверхностной зоне оптической детали, не вынимая дополнительно деталь из измерительного отсека. Крайне ограничены или вообще отсутствуют поляризационные измерения в широком диапазоне углов падения излучения на поверхность оптической детали. Таким образом, даже с учетом применения всего набора приставок задачи по оптическим измерениям тонкопленочных покрытий не решаются в полном объеме и с высокой точностью. Требуется квалифицированный персонал для работы с набором приставок на этих приборах.

Учитывая и конструктивные ограничения существующих приборов, и объективные задачи оптиков по измерениям оптических деталей с покрытиями, мы разработали серию спектрофотометров PHOTON RT специально для решения данных задач. Функциональные возможности



Рис. 1. Измерительный отсек спектрофотометра

прибора позволяют проводить в полностью автоматическом режиме:

- измерения коэффициентов пропускания и абсолютного зеркального отражения в УФ-, видимом и ИК-диапазонах ( $\lambda=185-5200$  нм);
- измерения под различными углами падения излучения на поверхность оптической детали (от 0 до 75°);
- измерения в поляризованном свете (S-, P-, средняя поляризация, произвольное положение плоскости поляризации от 0 до 90°);
- измерения с учетом смещения луча при его прохождении оптических образцов под большими углами падения излучения (учет смещения от 0 до 10 мм);
- измерения и расчет дисперсии показателя преломления и толщины слоя;
- многоступенчатые групповые измерения.

Разработано шесть вариантов исполнения прибора в зависимости от используемого спектрального диапазона: 380–1700 нм, 380–3500 нм, 380–5200 нм, 185–1700 нм, 185–3500 нм и 185–4900 нм. В качестве источников излучения применены галогенная лампа, дейтериевая лампа и твердотельный источник ИК-излучения накального типа. В прибор также штатно встроена ртутно-аргоновая лампа для калибровки прибора по длинам волн перед каждой процедурой.

Кинематическая схема работы прибора позволяет автоматически выполнять угловые измерения от 0 до 75° на пропускание и от 8 до 75° на отражение, с шагом 0,01°, не вынимая детали (рис.1).

Поэтому пользователь может измерять образцы под любыми углами падения зондирующего

излучения без изъятия детали и без проведения повторных калибровок базовой линии. Техническое решение гарантирует, что все измерения будут проводиться в одной и той же локальной поверхностной зоне исследуемого образца. Этот фактор является определяющим для сопоставления расчетных и фактических показателей оптического покрытия, а также последующей коррекции теоретической модели. Пример измерения отражения поляризатора в диапазоне углов от 70° до 74° с шагом в 1° представлен на рис.2. Требовалось подтвердить характеристики полученного покрытия:  $R_s$  более 95%,  $R_p$  менее 25% для спектрального интервала 750–850 нм.

Отличительной особенностью и важным достоинством прибора является наличие встроенных и автоматически управляемых поляризаторов.

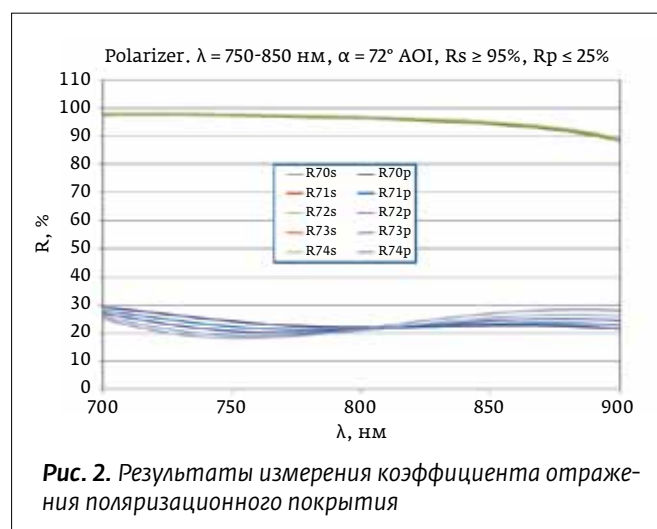
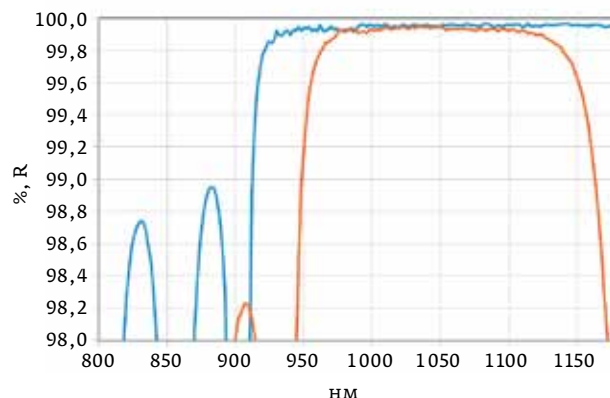
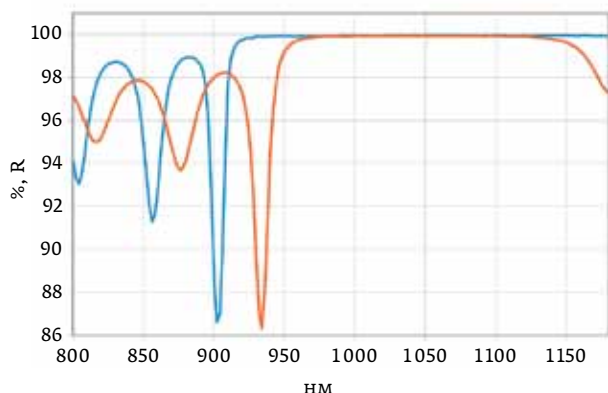


Рис. 2. Результаты измерения коэффициента отражения поляризационного покрытия



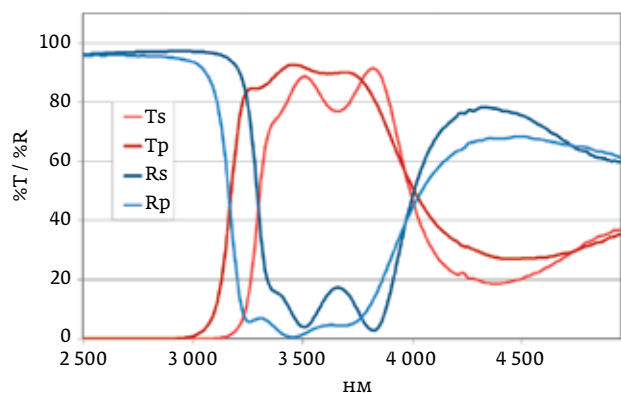
**Рис. 3.** Результаты измерения коэффициента отражения лазерного зеркала (S- и P-поляризация) под углом 45 градусов

Для выполнения качественных измерений с учетом S- и P-компонент поляризации применены высококонтрастные широкополосные поляризаторы. Максимальная контрастность в видимом диапазоне достигает 100 000 : 1, в средней ИК-области спектра – до 10 000 : 1. В ультрафиолетовой области достоверные измерения поляризующих покрытий можно проводить от 230 нм. Спектрофотометр PHOTON RT является единственным прибором, с помощью которого можно измерить подобные покрытия в спектральной области до 5200 нм. На рис.3 представлены результаты измерения характеристик многослойного интерференционного лазерного зеркала в области около 1064 нм, при этом абсолютные значения измерения достигают величины 99,95%.

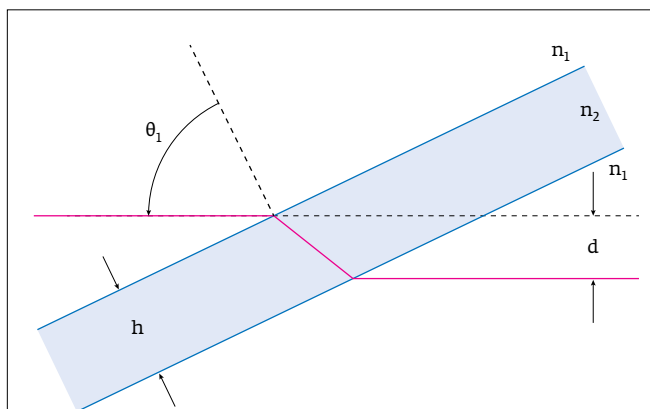
На рис.4 показаны результаты измерения параметров поляризующего покрытия в области

2500–5200 нм на пропускание и на отражение под углом 45°. Данные покрытия являются технически сложными для выполнения в условиях производства, но находят все большее распространение в связи с развитием лазерной техники среднего ИК-диапазона.

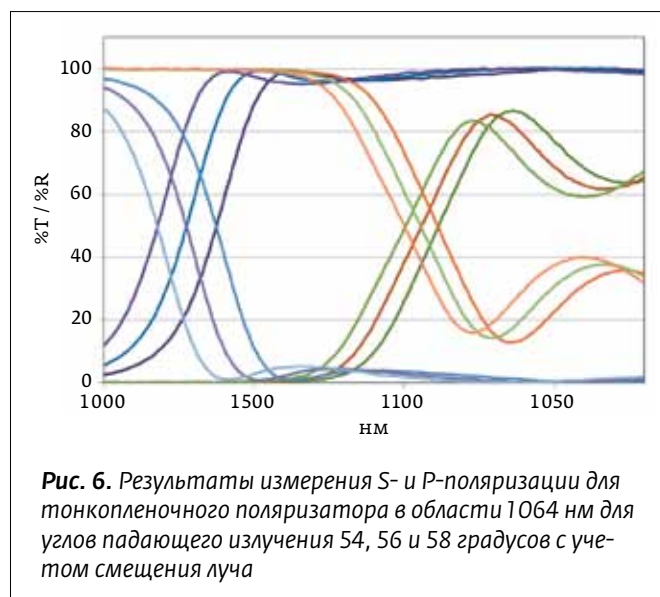
Оптические детали в конечном изделии могут занимать по отношению к падающему лучу практически любое, отличное от нормального, положение, исходя из оптической схемы самого изделия. Для измерений характеристик покрытий, нанесенных на плоскопараллельные детали, следует учесть явление, при котором происходит параллельное смещение проходящего луча от первоначального направления падения. Величина смещения зависит от угла падения излучения, толщины детали и показателя преломления материала, из которого она выполнена (рис.5). Отсутствие в измерительном приборе технической возмож-



**Рис. 4.** Результаты измерений коэффициентов пропускания и абсолютного зеркального отражения ИК-поляризатора в области 2500–5200 нм (S- и P-поляризация) под углом 45 градусов



**Рис. 5.** Смещение проходящего луча при измерении пропускания образцов под углами к нормали



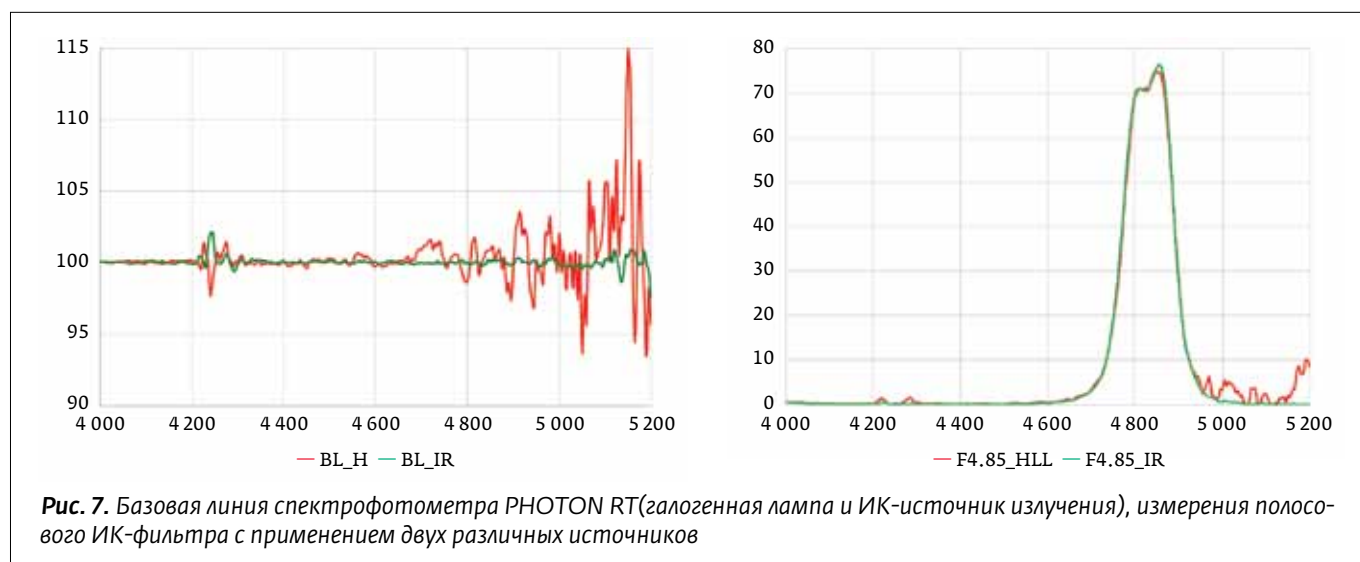
ности учета этого смещения и позиционирования фотоприемного устройства строго по оси смещенного луча приводит к существенным ошибкам в результатах измерений либо в целом – к невозможности получения достоверных результатов.

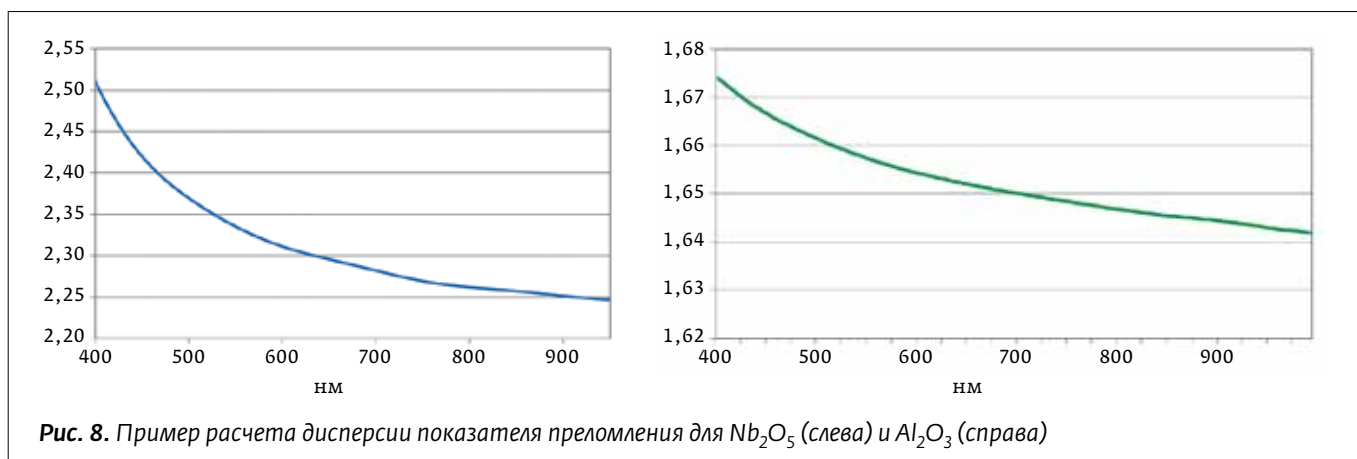
В спектрофотометре PHOTON RT реализовано ПО, предоставляющее возможность автоматически рассчитать такое смещение луча, и конструктивно обеспечено параллельное смещение фотоприемного устройства точно на величину до 10 мм, соответствующую вычисленному значению смещения. Тем самым производитель прибора гарантирует получение достоверных результатов измерений деталей в соответствии с реальными условиями их эксплуатации. На рис.6 показано измерение коэффициентов

пропускания и отражения поляризатора толщиной 10 мм на длине волны 1064 нм под углами 54, 56 и 58 градусов с учетом смещения луча.

Для обеспечения надежности измерений в средней ИК-области спектра в приборе используется твердотельный источник ИК-излучения. Спектральный диапазон его работы определен с длины волны порядка 3500 нм. В силу конструктивных особенностей данного источника его спектральная эффективность в области 3000–5000 нм в 4–8 раз выше, чем у галогенной лампы. Его применение обеспечивает достоверность измерений оптических характеристик с хорошим отношением сигнал-шум и более лучшим спектральным разрешением, чем при использовании галогенной лампы в этом диапазоне. На рис.7 показана фактическая базовая линия галогенной лампы и твердотельного ИК-источника в средней ИК-области спектра, а также примеры измерений диапазона пропускания полосового фильтра на длину волны 4850 нм, полученные с помощью двух различных источников излучения. Видно, что по амплитуде и по "шуму" использование ИК-источника излучения, безусловно, более предпочтительно.

Получение оптических покрытий происходит в вакуумных установках путем чередующегося нанесения высоко- и низкопреломляющих материалов на подложку. При этом каждый слой должен быть нанесен строго определенной толщины. Оптики-технологи используют различные программы для предварительного расчета структуры оптического покрытия, включая его синтез и оптимизацию, а также выработку оптимальной стратегии контроля напыления покрытия с учетом харак-



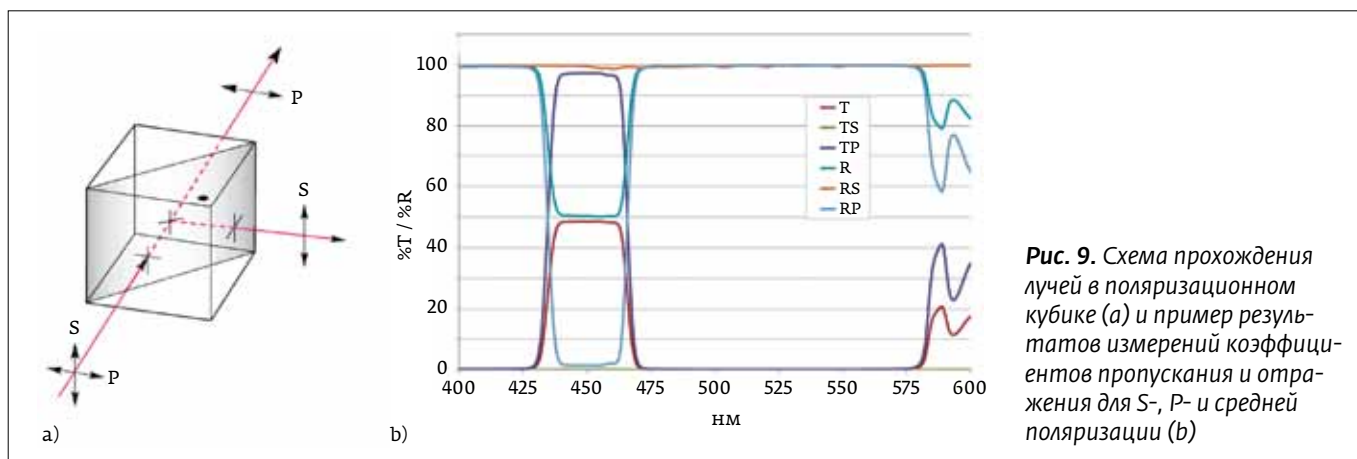


тера формы спектра получаемого покрытия после каждого слоя. Для расчета покрытия используются данные о дисперсии показателя преломления материалов по длинам волн. Известно, что фактическая дисперсия зависит от множества факторов и весьма часто отличается от теоретически предсказанной. Для случая получения покрытий методом электронно-лучевого испарения такими факторами оказываются чистота и "свежесть" материала, условия поддержания вакуума в камере, режимы работы установки, нагрев подложек, скорость вращения арматуры и т.д. Комбинация этих факторов может существенно повлиять на фактический показатель преломления. Использование дисперсии фактического показателя преломления для теоретических расчетов покрытий позволяет радикально минимизировать ошибки напыления и отклонения фактических спектров от расчетных.

В программном обеспечении спектрофотометра PHOTON RT реализован модуль автоматического измерения и расчета дисперсии показателя преломления и толщины одиночного слоя для непоглощающих материалов в выбранном пользователем диа-

пазоне спектра. Разработанная методика включает последовательное измерение отражения от покрытия под различными углами и последующий расчет. Само однослойное покрытие наносится на подложку с учетом выработанных пользователем условий напыления в вакуумной установке. При этом сохранение либо максимальная близость заданных технологических условий напыления материала на образце и получаемых в производственном процессе позволяет достичь главного: полученная дисперсия показателя преломления может быть использована в оптических расчетах. Тем самым достигается наиболее полное совпадение расчетных и фактических спектров при промышленном нанесении многослойных покрытий. На рис.8 показаны примеры расчета дисперсии показателя преломления для однослойных покрытий  $Nb_2O_5$  (толщиной 490 нм) и  $Al_2O_3$  (толщиной 53 нм).

Одними из примеров характерных оптических деталей, широко применяемых в приборах различного назначения, являются поляризационные и спектроделительные кубики. Кубик представляет собой две склеенные призмы. На поверхность





склейки нанесено поляризующее или спектроредительное покрытие, а на грани кубика – обычное просветляющее покрытие. Излучение, попадающее на грань кубика, проходит сквозь нее и падает на плоскость склейки под углом  $45^\circ$ . При этом часть излучения проходит в направлении падающего луча, вторая часть излучения выходит из кубика под углом  $90^\circ$  к падающему лучу, отражаясь от плоским склейки. В конструкторской документации могут быть указаны требования как к отдельным компонентам поляризации, так и к средней поляризации.

Измерение таких призм представляет определенную сложность, поскольку в обычных спектрофотометрах нет встроенных поляризаторов и нет возможности измерить отраженный луч. Кроме этого, проведение всех измерений при неизменном положении кубика представляется практически невозможным в обычных спектрофотометрах. Конструкция спектрофотометра PHOTON RT выполнена таким образом, что в такие высокоточные измерения выполняются автоматически, без участия оператора. На рис.9 представлена схема прохождения излучения в поляризационном кубике, а также пример измерения такого изделия с предельными показателями

контрастности. Отдельным случаем оценки качества таких призм является проведение измерений под различными углами падающего излучения (до  $30^\circ$  от нормали к поверхности). Подобные измерения необходимы, например, для призм, используемых в перспективных оптических приборах дополненной реальности. Спектрофотометр PHOTON RT был испытан для решения таких задач и продемонстрировал полное соответствие ожиданиям заказчиков.

Спектрофотометр PHOTON RT предназначен для измерения оптических деталей с нанесенными покрытиями. Спектральный диапазон измерений рекордно широк. Прибор выпускается серийно, он внесен в Государственные реестры средств измерений Беларуси и России, великолепно себя зарекомендовал как надежный, удобный и точный спектрофотометр. PHOTON RT представляет возможность проводить высокоточные измерения оптических характеристик деталей при схемах измерений на пропускание и отражение в условиях производства. С его помощью можно выполнять и иные сложные задачи, например проводить измерения призматических блоков или измерения дисперсии показателя преломления однослойных непоглощающих покрытий. ■