

ПРЕЦИЗИОННАЯ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЯ. АППАРАТУРА, МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ, ОБРАЗЦОВЫЕ МЕРЫ

М. А. Круглякова, канд. техн. наук; М. В. Никитин; С. М. Лейкин; В. А. Парфинский;
А. В. Борткевич, канд. физ.-мат. наук

— ВНИЦ «ГОИ им. С. И. Вавилова»

Приведены основные результаты работ ГОИ в области прецизионной спектrophотометрии. Кратко изложены основные проблемы, возникающие при получении точных значений спектrophотометрических характеристик материалов и покрытий. Сформулированы основные принципы подхода к обеспечению точности и единства спектrophотометрических измерений, разработанные в лаборатории прецизионной спектrophотометрии. Указаны основные характеристики аппаратуры и образцовых мер комплекса образцовых спектrophотометров — Комплекса ОСФ ГОИ.

Поступила в редакцию 3.02.95.

При всем многообразии областей применения спектrophотометрических методов измерений и исследований общими остаются проблемы оценки точности и достоверности результатов и обеспечения единства измерений. Прецизионная спектrophотометрия (под прецизионными понимаются измерения, для проведения которых используются специальные средства и методики, обеспечивающие снижение результирующей погрешности и направленные на максимальный учет как аппаратурных, так и методических факторов, влияющих на результат измерения) [1, 2] как научное направление стала развиваться в ГОИ с конца 60-х годов. Именно к этому времени повышение требований к точности измерений спектrophотометрических характеристик оптических материалов и невозможность выполнения этих требований на серийных спектrophотометрах с помощью традиционных методик привели к интенсивному развитию метрологии спектrophотометрии в нашей стране и за рубежом. Первые усилия были направлены на создание средств и разработку методов градуировки и поверки серийных коммерческих спектrophотометров [3—7] и на формулировку правил выбора режимов измерений, позволяющих наилучшим образом реализовать метрологические возможности приборов [8—11]. В результате выполнения этих работ появились, в частности, «Государственный стандарт на методы и средства поверки спектrophотометров» [12] и ряд государственных и отраслевых стандартов на методики измерения спектrophотометрических характеристик оптических материалов и покрытий.

После того как спектrophотометры стали поверяться по единой методике, оказалась возможной однозначная оценка основной аппаратурной погрешности для конкретных измерительных задач. Были разработаны методы определения комплексной характеристики спектrophотометра — энергетического фактора,

а также получен количественный критерий оптимального выбора режимов измерений [2, 10, 13], позволяющий минимизировать сумму составляющих погрешности, обусловленных конечностью выделяемого спектрального интервала, шумами и инерционностью приемно-регистрирующей системы. В этом случае реализуется оптимальный компромисс: наибольшая скорость при заданном значении точности измерения полосы в спектре либо максимальная точность при заданном времени измерения.

Выполнение первого этапа работ по метрологическому обеспечению спектrophотометрии позволило проводить обоснованную оценку аппаратурной составляющей погрешности измерений. Однако результаты исследований показали, что правильность и тем более точность результатов в спектrophотометрии не могут быть гарантированы только за счет регулярной поверки спектrophотометров и правильного выбора режимов сканирования. Для многих видов спектrophотометрических измерений значительно большую роль, чем аппаратурные, имеют методические погрешности. Это связано с изменениями температуры образца, поляризации излучения и условий фокусировки, происходящими при взаимодействии излучения с измеряемым образцом. При измерениях в лазерном излучении дополнительную погрешность могут вносить изменения параметров когерентности излучения. Суммарная методическая погрешность, как показывает практика, может существенно (иногда на порядок и более) превысить аппаратурную [14—21]. Разработанные для компенсации методических погрешностей технические и методические приемы во многих случаях позволяют уменьшить эти погрешности до приемлемых значений, но требуют создания специальных приспособлений, многократно увеличивают время измерений и не могут быть использованы в практике обычных (не

специально метрологических) лабораторий. Однако для многочисленных промышленных, научных и специальных применений оптики необходимы максимально точные значения спектрофотометрических характеристик материалов, покрытий и оптических деталей (фильтров, зеркал, светоделителей).

Потребности практики выдвинули метрологические проблемы спектрофотометрии в число важных направлений деятельности института, определяющих пути дальнейшего прогресса оптического приборостроения [22]. Содержание этого направления было определено программой работ «Комплекс образцовых спектрофотометров» (Комплекс ОСФ). Главной целью программы стало создание комплекса уникальной аппаратуры, эталонов и разработка методов измерений, обеспечивающих снижение погрешности измерений спектральных коэффициентов пропускания и отражения до значений порядка 0,1%. В соответствии с программой в конце 70-х годов под руководством В. А. Никитина и В. Г. Воробьева были начаты работы по созданию Комплекса ОСФ, первый этап которых завершился вводом в эксплуатацию в 1985 г. основных установок и их метрологической аттестацией, проведенной с участием метрологического отдела ГОИ и представителей Госстандарта (ВНИИОФИ, ВНИИМ). С этого времени Комплекс ОСФ служит метрологической базой спектрофотометрических измерений в отрасли, в соответствии с чем основными направлениями его деятельности являются следующие:

разработка теоретических и прикладных вопросов методологии прецизионной спектрофотометрии;

совершенствование Комплекса ОСФ и расширение его функциональных возможностей путем модернизации действующих и создания новых измерительных установок в связи с появлением новых методов измерений и новых измерительных задач;

сохранение высокого метрологического уровня прецизионных спектрофотометрических установок комплекса путем периодических (не менее одного раза в три месяца) контрольных измерений образцов с известными и стабильными характеристиками; периодическая (не реже одного раза в пять лет) поверка установок по полной программе с привлечением представителей Росстандарта;

создание и аттестация образцовых мер спектрофотометрических величин;

спектрофотометрическая аттестация стандартных образцов материалов и покрытий; выполнение точных измерений спектральных коэффициентов пропускания и отражения образцов оптических материалов и деталей;

эти образцы используются для поверки рабочих спектрофотометров в качестве образцовых мер пропускания или отражения, при измерениях методом замещения или в качестве стандартных образцов оптических свойств материалов.

Аппаратура Комплекса ОСФ

В настоящее время в Комплекс ОСФ входят шесть прецизионных спектрофотометрических установок, метрологические характеристики которых соответствуют требованиям, предъявляемым к верхнему звену государственной поверочной схемы для измерений спектральных коэффициентов направленного пропускания, зеркального отражения в области 0,2...25 мкм и спектральных коэффициентов диффузного отражения в спектральной области 0,25...20 мкм [23], что подтверждено первичной метрологической аттестацией, проведенной совместно с ВНИИОФИ в 1989 году, и в соответствии с регламентом повторной метрологической аттестацией, проведенной в декабре 1993 г.

Основными установками Комплекса ОСФ являются:

инфракрасный спектрофотометр для измерения спектральных коэффициентов направленного пропускания и зеркального отражения в области спектра от 2,5 до 50 мкм, абсолютная фотометрическая погрешность в пределах $\pm 0,001$ в области спектра 2,5...25 мкм и $\pm 0,01$ в области спектра 25...50 мкм;

спектрофотометр для измерения спектральных коэффициентов направленного пропускания и зеркального отражения в области спектра 0,2...2,5 мкм, абсолютная фотометрическая погрешность в середине спектрального диапазона в пределах $\pm 0,001$;

инфракрасный спектрофотометр для измерения спектральных направленно-полусферических коэффициентов отражения и пропускания (коэффициентов яркости при равномерно-диффузном полусферическом освещении) светорассеивающих материалов в области спектра 2,5...20 мкм; абсолютная погрешность измерений в пределах $\pm 0,02$; на установке можно измерять характеристики сыпучих материалов (порошков) в свободном состоянии [24, 25];

спектрорефлектометр для измерения спектральных коэффициентов отражения высокоотражающих зеркал в области 1,5...15 мкм; фотометрический диапазон измерений от 0,8 до 1; детальный анализ условий взаимодействия излучения с образцом подтвердил возможность абсолютных измерений высоких отражений с относительными погрешностями

в пределах $\pm 0,1\%$ и достоверным определением разности в коэффициентах отражения 0,0002 [26, 27];

гониофотометр для измерения пространственных индикатрис рассеяния на лазерных длинах волн 0,63; 1,15; 3,39; 10,6 мкм и при некогерентном освещении в спектральном диапазоне от 1 до 25 мкм с угловым разрешением от 10 угл. мин до 1 угл. град; на основании результатов измерения индикатрис рассеяния рассчитываются индикатрисы коэффициентов яркости; абсолютная погрешность определения коэффициентов яркости в пределах $\pm 0,05$;

фотометр на импульсных лазерах для измерения спектральных коэффициентов направленного и диффузного пропускания и отражения на лазерных длинах волн 532, 694 и 1064 нм; фотометрический диапазон измерений оптической плотности от 0 до 8; диапазон углов падения излучения $0 \dots 85^\circ$, степень поляризации излучения до 99,998%; плотность мощности излучения на поверхности измеряемого образца до 80 МВт/см² [28—31].

«Термостат ОСФ и «КРИАП ОСФ» — системы для проведения спектрофотометрических измерений при заданных значениях температуры образцов; в сочетании с измерительными установками комплекса они позволяют измерять спектральные коэффициенты направленного пропускания и зеркального отражения в интервалах температур 300... 500 К и 5... 300 К [32].

Для получения необходимой предварительной информации о спектрофотометрических характеристиках измеряемых объектов используются серийные УВИ- и ИК-спектрофотометры с приставками для измерений зеркального и диффузного отражения, а также зональные фотометры для оценки влияния оптической неоднородности образца на результаты измерений на других приборах Комплекса ОСФ.

Методы измерений

Как уже отмечалось, самая точная аппаратура не исключает вероятности методических погрешностей, обусловленных взаимодействием излучения и образца. Поэтому методы точных измерений, применяемые на Комплексе ОСФ, предусматривают количественный учет условий измерений. В соответствии с разработанными В. А. Никитиным представлениями о многомерной аппаратной функции спектрофотометрических измерений (АФИ) [1, 2, 33, 34] значение спектрофотометрической характеристики X , получаемое при измерениях, необходимо рассматривать как функцию нескольких переменных $X(\lambda, \varphi_1, \varphi_2, x_1, x_2)$,

где λ — длина волны падающего на образец излучения; φ_1, φ_2 — углы падения и наблюдения; x_1, x_2 — координаты центра освещенного участка образца.

Процесс измерения в общем случае описывается кратным интегралом суперпозиции (свертки) измеряемой функции $X(\lambda, \varphi, x)$ и аппаратной функции измерений $A(\lambda, \varphi, x)$, описывающей спектральную ($\delta\lambda$) и пространственную ($\delta\varphi, \delta x$) селективность прибора.

Для любых измерений при заданных (установленных на приборе) значениях λ', φ', x' аппаратная функция $A(\lambda, \varphi, x)$ имеет конечные ширины $\delta\lambda, \delta\varphi, \delta x$ и может существенно (для точных измерений) отличаться от нуля вне главной части контура. В соответствии с этим при настройке прибора на разные значения λ', φ', x' приходится рассматривать четыре вида систематических погрешностей, обусловленных параметрами АФИ [1, 2]:

погрешности $\Delta\lambda, \Delta\varphi, \Delta x$ настройки прибора на заданные значения λ', φ', x' вносят в результаты измерений погрешности, пропорциональные первым производным измеряемой характеристики X по соответствующим координатам;

конечность ширин $\delta\lambda, \delta\varphi, \delta x$ АФИ (спектральное, угловое, пространственное разрешение) вносит в результаты измерений погрешности, пропорциональные вторым производным измеряемой характеристики X по соответствующим координатам;

отличия АФИ от нуля на «крыльях» действуют интегрально, внося специфические погрешности от «мешающего излучения»;

асимметрия формы АФИ может вносить значительную неопределенность при отнесении результатов измерения к заданным значениям аргументов.

Для уменьшения погрешности первого вида требуется главным образом высокое качество — тонкость регулировки и четкая фиксация соответствующих механических узлов, а также тщательная градуировка прибора по длинам волн. Для оценки неисключенных остатков систематических погрешностей необходима предварительная оценка производных измеряемой характеристики.

Неисключенный остаток систематической погрешности второго вида — результат неизбежного компромисса между попытками уменьшить эту погрешность, увеличивая избирательность системы, и неизбежным увеличением шумов при уменьшении геометрического фактора. Оптимум достигается путем учета результатов предварительных исследований зависимости $X(\lambda), X(\varphi), X(x)$, которые проводятся с помощью вспомогательной аппаратуры Комплекса (спектрофотометров для записи обзорных спектров, приставок для ори-

ентировочных угловых измерений, зональных фотометров).

У приборов, измеряющих полные (полусферические) коэффициенты отражения и пропускания, угловая ширина аппаратной функции $\Delta\theta$ близка к 2λ и для определения неисключенного остатка систематических погрешностей измерений необходимо рассматривать не только ширину, но и весь контур АФИ. Неравномерность угловой составляющей АФИ в сочетании со сложной и, как правило, заранее неизвестной индикатрисой рассеяния образца, является основной причиной того, что реально достигнутые в мире точности измерения светорассеивающих образцов с произвольной индикатрисой рассеяния примерно на порядок ниже, чем нерассеивающих [35—37]. Для исключения этой составляющей погрешности измерений необходимо знание контура угловой составляющей АФИ и пространственной индикатрисы рассеяния образца. Математическая обработка такой информации позволяет в несколько раз уменьшить систематическую погрешность измерений.

Компенсация и учет неисключенных остатков систематических погрешностей от мешающего излучения проводятся по методикам, разработанным ранее для точных измерений на лучших коммерческих спектрофотометрах [20, 38, 39].

Существенное значение имеют и условия измерений, не включенные в понятие АФИ: температура образца, поляризация и когерентность излучения. На комплексе разработаны и применяются при точных измерениях методики исследования, компенсации и учета дополнительных погрешностей, обусловленных температурными [18, 21, 40—42] и поляризационными [17, 43] эффектами.

Подробное изложение основ методологии прецизионной спектрофотометрии и методов учета систематических погрешностей содержится в подготовленных В. А. Никитиным и В. Г. Воробьевым выпусках серии «Прецизионная спектрофотометрия материалов и покрытий» [2, 13].

Образцовые меры для спектрофотометрии

Разработанные в лаборатории и поставляемые по заказам высокостабильные образцовые меры для спектрофотометрии по назначению и особенностям применения можно разделить на следующие группы:

1. *Образцовые меры длин (волновых чисел)* для градуировки и поверки спектральной шкалы. В эту группу входят:

кюветы с чистыми газами (аммиак, метан, окись углерода), линии поглощения которых в области спектра от 1,4 до 20 мкм воспроиз-

водят значения длин волны с относительной погрешностью в пределах $\pm 0,02\%$;

кюветы с аммиаком и метаном при малом давлении применяются также для определения спектральной ширины щелей в области 10 и 3 мкм [44, 45];

кристаллы и стекла с редкоземельными добавками, узкие полосы поглощения которых воспроизводят значения длин волн в области от 0,2 до 6 мкм с относительными погрешностями порядка $\pm 0,1\%$ [46, 47].

2. *Образцовые меры спектральных коэффициентов направленного пропускания* для поверки фотометрических шкал и изменения масштаба фотометрической шкалы при измерениях малых значений пропускания и отражения. В эту группу входят:

секторные диски, значения коэффициентов пропускания которых от 0,10 до 0,95 с дисперсностью 0,05 определены с абсолютной погрешностью в пределах $\pm 5 \cdot 10^{-5}$ при доверительной вероятности 0,99 [13];

диски с отверстиями, расположенными по специально рассчитанному закону, воспроизводящие значения коэффициента пропускания 0,01; 0,02; 0,03 с относительными погрешностями $\pm 1\%$.

наборы светофильтров из кварца КИ и нейтральных стекол, воспроизводящие в локальных экстремумах значения коэффициентов пропускания от $1 \cdot 10^{-4}$ до 0,9 с относительными погрешностями от 5 до 0,2% соответственно [49];

наборы плоскопараллельных пластин с толщинами от 1 до 10 мм из материалов с показателями преломления от 1,3 (фторид лития) до 4 (германий), используемые для экспериментальной оценки дополнительных погрешностей, обусловленных температурными [40—42] и поляризационными [17] эффектами, а также для оценки погрешностей измерений коэффициентов внутреннего пропускания и показателей поглощения, обусловленных различиями в фокусировке пучков излучения в оптических системах для образцов разной оптической толщины; эти наборы могут применяться для поверки и аттестации спектрофотометров с малоинерционными приемно-регистрационными системами (Фурье, растровые и т. п.), для которых неприменимы диски [50—52].

3. *Образцовые меры спектральных коэффициентов зеркального отражения*, предназначенные для поверки спектрорефлектометров и для измерений методом замещения на спектрофотометрах с приставками зеркального отражения. В эту группу входят:

зеркала размером $110 \times 55 \times 9$ мм с родиевым покрытием, воспроизводящие значения спектральных коэффициентов зеркального от-

ражения с относительной погрешностью от $\pm 0,1$ до $\pm 0,2$ % для области спектра 1,5... 35 мкм [27];

зеркала с диаметром рабочей поверхности 30 мм с металлическими покрытиями, воспроизводящие значения спектрального коэффициента зеркального отражения для области спектра 0,25... 50 мкм с относительными погрешностями от $\pm 0,2$ до ± 1 % для разных участков спектрального диапазона;

образцовые меры малых отражений — клиновидные пластинки с углом 10° и диаметром рабочей поверхности 30 мм, изготовленные из стекла, кварца и фторидов кальция, лития, бария, воспроизводящие в спектральной области 0,3... 12 мкм значения спектрального коэффициента зеркального отражения 0,02... 0,04 с относительными погрешностями в пределах ± 1 %;

клиновидные пластинки из бескислородных стекол и германия, воспроизводящие значения спектрального коэффициента зеркального отражения порядка 0,20 и 0,36 для спектральной области от 2,5 до 16 мкм с относительными погрешностями в пределах 0,3 % и используемые как для поверки фотометрической шкалы спектрорефлектометров, так и в сочетании с калиброванным оптическим ослабителем для измерений малых отражений в ИК-области спектра [53].

4. *Образцовые меры спектральных коэффициентов отражения*, предназначенные для поверки спектрорефлектометров и измерений методом сравнения на спектрофотометрах с приставками диффузного отражения. В эту группу входят:

образцы из светорассеивающих стекол [54], воспроизводящие значения коэффициента отражения от 0,15 до 0,96 в области длин волн 0,4... 0,8 мкм с относительными погрешностями от $\pm 0,5$ до $\pm 0,8$ % (при направленном освещении, углах падения, близких к нормали, и угле наблюдения 2π).

Перспективы развития Комплекса ОСФ

Комплекс ОСФ со времени своего создания служит метрологической базой спектрофотометрических измерений для ГОИ, отрасли и в значительной мере для всей страны. Разработанные и аттестованные на ОСФ образцовые меры для спектрофотометрии используются метрологическими службами всех уровней при аттестации рабочих средств измерений — приборов и установок. На комплексе проводится периодическая аттестация образцовых мер, входящих в состав набора поверочных средств для ИК-спектрофотометров [12, 55].

Многолетний опыт использования Комплекса ОСФ показал, что система обеспечения единства измерений на основе общегосударственной поверочной схемы может гарантировать контроль только аппаратурных погрешностей и недостаточна для спектрофотометрических измерений на практике, так как значительную, а часто преобладающую роль в этом случае играют методические погрешности, связанные с объектом исследований. Поэтому был бы целесообразен переход к принятой в мире практике стандартизации методики измерений спектрофотометрических характеристик конкретных типовых объектов. В этом случае весьма ценным окажется научный и методический задел, наработанный лабораторией за последние 30 лет.

В лаборатории ведется работа по сравнительному анализу отечественных, международных и национальных систем описания фотометрических свойств материалов и покрытий и обеспечению единства измерений. Цель этой работы — определение перспектив развития прецизионной спектрофотометрии и путей включения отечественных средств измерений и методик в международную практику. Первый шаг, сделанный в этом направлении, — поставка в NPL (Англия) образцовых мер длин волн для исследований, межлабораторных сличений и оценки перспектив их использования в системе Евромет.

Результаты измерений, выполненных на Комплексе ОСФ, используются разработчиками и исследователями оптических материалов [55—59], а также при составлении справочников и каталогов [60].

Следует отметить, что при создании Комплекса ОСФ основное внимание было сосредоточено на метрологическом обеспечении измерений оптических нерассеивающих материалов, покрытий и тел. Сейчас спектрофотометрические методы широко применяются для исследований и анализа технических, природных и биологических объектов, большую часть которых можно отнести к светорассеивающим. Поэтому в последнее время особое внимание уделяется развитию средств и методов для обеспечения единства измерений спектрофотометрических характеристик светорассеивающих объектов. К таким характеристикам относятся коэффициенты диффузного отражения и пропускания, коэффициенты яркости и их пространственные индикатрисы. Для успешного решения этой задачи необходимо:

— создание методов и аппаратуры для измерений спектрофотометрических характеристик рассеивающих излучение объектов;

— анализ АФИ для измерений светорассеивающих объектов и разработки методов опти-

мизации условий и повышения точности измерений;

развитие и экспериментальная проверка теорий светорассеяния в ИК-области спектра.

Для расширения возможностей Комплекса ОСФ в области измерений характеристик светорассеяния разработана установка для определения спектральных коэффициентов диффузного пропускания и отражения в области длин волн 0,25...2,5 мкм.

На сегодняшний день Комплекс ОСФ располагает аппаратурой для измерений как интегральных по углу спектрофотометрических характеристик, так и их угловых (пространственных) распределений. Совместная ком-

пьютерная обработка результатов этих измерений позволяет существенно увеличить объем и повысить достоверность получаемой на комплексе информации об оптических свойствах промышленных и природных веществ. На практике эта информация используется как при решении актуальных задач прикладной спектрофотометрии — прецизионных измерений светорассеивающих объектов и создания образцовых мер с различными индикаторами коэффициента яркости, так и при получении достоверных экспериментальных данных для фундаментальных исследований по теории и модельным описаниям процессов взаимодействия излучения с веществом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никитин В. А., Воробьев В. Г.//ОМП. — 1988. — № 12. — С. 47—56.
2. Никитин В. А. Серия «Прецизионная спектрофотометрия материалов и покрытий», вып. 1//ГОИ. — 1990. — 92 с.
3. Александров А. Н., Никитин В. А.//УФН. — 1955. — Т. 56, вып. 1. — С. 3—53.
4. Tables of Wavenumbers for the Calibration of IR Spectrometers. — Pure and Applied Chemistry// IUPAC. — 1961. — Vol. 1, № 4. — P. 537—700.
5. Воробьев В. Г., Никитин В. А.//ОМП. — 1974. — № 5. — С. 60—79.
6. Воробьев В. Г., Никитин В. А.//ОМП. — 1971. — № 6. — С. 54—60.
7. Юдина С. Л., Круглякова М. А., Афанасьева Н. И.//Измерит. техн. — 1969. — № 8. — С. 25—27.
8. Potts W. J., Smith A. L.//Appl. Opt. — 1967. — Vol. 6, № 2. — P. 257—265.
9. Никитин В. А., Воробьев В. Г.//Журн. прикл. спектр. — 1971. — Т. 14, № 6. — С. 1050—1054.
10. Никитин В. А.//Журн. прикл. спектр. — 1968. — Т. 9, № 4. — С. 625—628.
11. Смолкин И. К., Гопштейн Н. М., Жемякин В. У.//ОМП. — 1968. — № 10. — С. 72—73.
12. ГОСТ 8.229.—81.
13. Воробьев В. Г. Серия «Прецизионная спектрофотометрия материалов и покрытий», вып. 2//ГОИ. — 1992. — 123 с.
14. Воробьев В. Г., Никитин В. А.//ОМП. — 1975. — № 1. — С. 71—72.
15. Воробьев В. Г., Семенова Г. П.//ОМП. — 1976. — № 9. — С. 44—46.
16. Аркатова Т. Г., Воробьев В. Г., Михайлов Б. А.//ОМП. — 1978. — № 1. — С. 5—7.
17. Круглякова М. А., Тохадзе Л. А.//ОМП. — 1979. — № 10. — С. 11—13.
18. Воробьев В. Г., Круглякова М. А.//ОМП. — 1983. — № 7. — С. 7—10.
19. Воробьев В. Г.//ОМП. — 1979. — № 9. — С. 5—8.
20. Воробьев В. Г., Гончар Т. Г., Круглякова М. А.//ОМП. — 1985. — № 7. — С. 6—8.
21. Воробьев В. Г., Журавлев Б. Ю., Юшко Т. Т.//ОМП. — 1989. — № 9. — С. 22—24.
22. Мирошников М. М.//ОМП. — 1978. — № 12. — С. 2—7.
23. ГОСТ 8.557—91.
24. Гуревич М. М., Середенко М. М., Морозова Л. В. и др.//ОМП. — 1975. — № 2. — С. 31—35.
25. Парфинский В. А.//ОМП. — 1986. — № 7. — С. 54—60.
26. Семенова Г. П., Воробьев В. Г., Пушкин Ю. Д.//ОМП. — 1976. — № 4. — С. 78—79.
27. Семенова Г. П., Морозов В. Н., Николаев Л. Ф. и др.//ОМП. — 1988. — № 4. — С. 9—11.
28. Кислов А. В.//Импульсная фотометрия.—Л.: Машиностроение, 1981. — Вып. 7. — С. 8—11.
29. Кислов А. В., Кувалдин Э. В.//Импульсная фотометрия.—Л.: Машиностроение, 1981. — Вып. 7. — С. 14—15.
30. Каданер Г. И., Кислов А. В., Кувалдин Э. В.//Импульсная фотометрия.—Л.: Машиностроение, 1981. — Вып. 7. — С. 73—77.
31. Каданер Г. И., Кислов А. В., Кувалдин Э. В.//Импульсная фотометрия.—Л.: Машиностроение, 1984. — Вып. 8. — С. 38—40.
32. Демисhev А. Г., Пельх Д. П., Широков А. К. и др.//ОМП. — 1988. — № 3. — С. 26—29.
33. Никитин В. А.//Приборы и методы спектроскопии.—Новосибирск, 1979. — С. 48—54.
34. Никитин В. А.//ОМП. — 1979. — № 1. — С. 12—14.
35. Новицкий Л. А., Степанов Б. М. «Оптические свойства материалов при низких температурах: Справочник.—М.: Машиностроение, 1980. — 224 с.
36. Clarke F. J. J., Larkin J. A.//Infrared Phys. — 1985. — Vol. 25, № 2/2. — P. 359—372 с.
37. Парфинский В. А.//ОМП. — 1986. — № 7. — С. 54—60.
38. Воробьев В. Г., Круглякова М. А.//Исследования в области оптических и световых измерений: Труды метрологических институтов СССР. — 1976. — Вып. 193(253). — С. 37—39.
39. Воробьев В. Г., Гончар Т. Г.//Исследования в области оптических и световых измерений: Труды метрологических институтов СССР. — 1976. — Вып. 193(253). — С. 40—41.
40. Воробьев В. Г., Юшко Т. Т.//ОМП. — 1980. — № 6. — С. 4—5.
41. Воробьев В. Г., Юшко Т. Т.//ОМП. — 1980. — № 8. — С. 56—57.
42. Воробьев В. Г., Юшко Т. Т.//Журн. прикл. спектр. — 1981. — Т. 35, № 1. — С. 173—175.
43. Круглякова М. А., Воробьев В. Г.//ОМП. — 1984. — № 2. — С. 12—14.
44. Воробьев В. Г., Круглякова М. А., Семенова Г. П.//ОМП. — 1979. — № 11. — С. 48—49.
45. Воробьев В. Г., Круглякова М. А., Смирнов В. А. и др.//ОМП. — 1988. — № 7. — С. 3—4.
46. Воробьев В. Г. и др.//ОМП. — 1988. — № 1. — С. 60—62.
47. Сугак Д. Ю., Матковский А. О., Воробьев В. Г. и др.//ОМП. — 1990. — № 6. — С. 73—74.

48. Воробьев В. Г., Круглякова М. А., Юдина С. Л.//Измерит. техн. — 1972. — № 11. — С. 25—26.
49. Воробьев В. Г., Круглякова М. А., Никитин В. А. и др.//ОМП. — 1991. — № 2. — С. 23—26.
50. Аркатова Т. Г., Воробьев В. Г., Круглякова М. А.//ОМП. — 1983. — № 12. — С. 52—53.
51. Аркатова Т. Г., Брынкова Т. Н., Круглякова М. А. и др.//ОМП. — 1983. — № 11. — С. 27—30.
52. Никитин В. А., Воробьев В. Г.//Тез. докл. 7-й Всесоюз. конф. «Фотометрия и ее метрологическое обеспечение». — М.; ВНИИОФИ, 1988. — С. 6—7.
53. Брынкова Т. Н., Воробьев В. Г., Гончар Т. Г. и др.//ОМП. — 1988. — № 9. — С. 7—10.
54. Оптические кристаллические материалы: Каталог/Под ред. Г. Т. Петровского. — Л.: НИИТИОМ ГОИ, 1991.
55. Круглякова М. А., Никитин М. В.//Вестник ноу-хау.—1993.— Вып. 7, № 5.— С. 58—61.
56. Ефимов А. М., Макарова Е. Г.//Труды VIII Всесоюз. совещ.—Л.: 1988.— С. 52—60.
57. Ефимов А. М.//Физ. и хим. стекла.— 1989.— Т. 15, № 3.— С. 366—376.
58. Efimov A. M., Makarova E. G.//Glass'89. Survey Papers of the 15-th Internat. Congress on Glass.— Leningrad.: Nauka, 1989.— R. 108—113.
59. Ефимов А. М.//Тез. докл. VII Всесоюз. симпозиум «Оптические и спектральные свойства стекол». — Л., 1989. — С. 150—151.
60. Шевлякова Н. М., Макарова Е. Г., Ефимов А. М. и др.//Тез. докл. XII Всесоюз. совещ. «Применение колебательных спектров к исследованию неорганических и координационных соединений». — Минск, 1989. — С. 29.

* * *