

УДК 543.423

МНОГОКРИСТАЛЬНЫЕ СБОРКИ ЛИНЕЕК ФОТОДИОДОВ ДЛЯ АТОМНО-ЭМИССИОННОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

© В. А. Лабусов^{1,2}

Изложена информация о создании многокристалльных сборок линеек фотодиодов (плоских, многострочных, по кругу Роуланда), в том числе сборок без “мертвых” зон для решения задач атомно-эмиссионного спектрального анализа. Кристаллы линеек размещены согласно требуемой поверхности фокусировки спектра и имеют постоянные фотоэлектрические и геометрические параметры благодаря стабилизации температуры сборки. Рассмотрены основные типы и приведены параметры многокристалльных сборок для оснащения существующих спектрографов и квантометров, а также для создания новых.

В настоящее время для регистрации протяженных спектров длиной от 15 до 50 см производители оборудования для атомно-эмиссионного спектрального анализа применяют сборки из нескольких линейных многоэлементных твердотельных детекторов излучения в их корпусном фирменном изготовлении. Так, на основе многолинейчатых сборок фирма Spectro (Германия) создала спектрометр Ciros [1]. Фирмы “Морс” (г. Троицк Московской обл.) [2], “Славна” (г. Заречный Свердловской обл.), “Спектральная лаборатория” (С.-Петербург) и другие производители изготавливают многолинейчатые сборки для замены устаревших систем регистрации спектров (фотопластинок и ФЭУ) в существующих спектральных приборах. В сборках применяют преимущественно линейки приборов с зарядовой связью (ПЗС) японских фирм Sony (ILX511 и ILX526A) и Toshiba (TCD1304AP). Конструкции сборок определяются в основном длиной корпуса линеек ПЗС, которая примерно в 1,5 раза больше, чем длина фоточувствительной области. Каждая линейка сборки крепится и юстируется отдельно, а для уменьшения размеров “мертвых” (нечувствительных к излучению) зон на их стыках производится разводка фрагментов спектра зеркалами. Недостатки конструкции проявляются главным образом при изменении температуры окружающей среды, когда происходит смещение спектральных линий относительно фотоячеек (так называемый дрейф спектра), причем такое смещение является индивидуальным для каждой из линеек. В области стыка протяженностью около 0,5 мм часть излучения перекрывается краем зеркала. В этой области дрейф спектра приводит к значительным изменениям интенсивности линий и, следовательно, к увеличению погрешности анализа.

Существенно более простой и надежной в эксплуатации является конструкция сборок из линейных детекторов в безкорпусном (иначе в кристалльном) ис-

полнении. Такие сборки, называемые многокристалльными, созданы на основе базовых линеек фотодиодов в кристалльном исполнении с фотоэлектрическими и геометрическими (конструктивными) характеристиками, необходимыми для обеспечения высокой технологичности построения сборок на их основе и для получения результатов атомно-эмиссионного спектрального анализа с метрологическими показателями качества по меньшей мере не хуже, чем с традиционными системами — фотопластинками и ФЭУ [3, 4].

Цель настоящей работы — ознакомление специалистов с основными типами и параметрами многокристалльных сборок линеек фотодиодов, разработанных на основе линеек фотодиодов БЛПП-369 в кристалльном исполнении и широко применяемых в настоящее время в многоканальных анализаторах атомно-эмиссионных спектров (анализаторах МАЭС) [5]. В отличие от известных решений безкорпусные кристаллы линеек с односторонними полиамидными шлейфами размещены на едином термостабилизированном основании. Корпус сборки наполнен инертным газом с избыточным давлением. Такие сборки имеют ряд преимуществ перед многолинейчатыми сборками из линеек ПЗС: более высокие УФ чувствительность и динамический диапазон, отсутствие блюминга, большой сбор фотонов из-за увеличенной высоты фотоячеек, а также высокую стабильность фотоэлектрических и геометрических параметров.

При создании многокристалльных сборок были приняты во внимание следующие факторы. Параметры полупроводниковых детекторов существенно зависят от температуры окружающей среды. Так, например, темновой ток фотодиодов линейки БЛПП-369 при уменьшении температуры на 20 °С снижается в 10 раз (рис. 1). Поэтому при решении измерительных спектральных задач для компенсации темнового тока путем вычитания заранее измеренных опорных значений необходимо, чтобы детектор работал при постоянной температуре. В то же время для снижения его порога чувствительности необходимо уменьшать зна-

¹ Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Россия.

² ООО “ВМК-Оптоэлектроника”, г. Новосибирск, Россия.

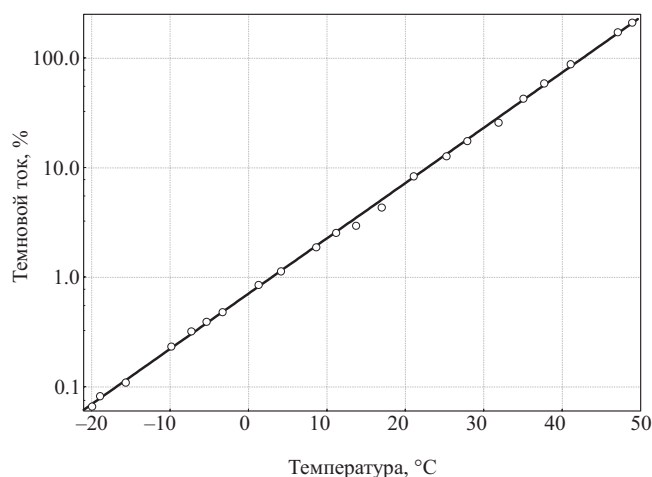


Рис. 1. Зависимость темнового тока фотодиодов линейки типа БЛПП-369 от температуры

чение среднего квадратического отклонения (СКО) выходного сигнала при отсутствии излучения. График зависимости СКО выходного сигнала линейки фотодиодов БЛПП-369 от темнового тока представлен на рис. 2. Уменьшения значения СКО, как следует из этого графика, можно достигнуть за счет снижения темнового тока путем понижения температуры линейки (см. рис. 1).

Наилучшие результаты по охлаждению и стабилизации температуры детектора достигаются с помощью термоэлектрических холодильников Пельтье. Электрическая мощность, требуемая для поддержания заданной температуры полупроводникового кристалла линейки фотодиодов, в несколько раз ниже, чем при охлаждении линейки в корпусе. Сборка из нескольких кристаллов линеек в одном корпусе позволяет разместить их по поверхности фокусировки атомно-эмиссионного спектра с малыми размерами “мертвых” зон. Кристаллы устанавливаются на монолитном основании из алюминиевого сплава, обеспечивающем выравнивание их температуры. В тепловом контакте с кристаллами находится датчик температуры, входящий в состав системы ее стабилизации, благодаря которой линейки многокристалльной сборки имеют постоянные фотоэлектрические и геометрические параметры. Корпус многокристалльной сборки герметичен, наполнен инертным газом с избыточным давлением и имеет входное окно для прохождения излучения. В нем установлены датчики для контроля давления газа и температуры корпуса, а также энергонезависимая память для хранения информации о сборке (тип кристаллов, их количество, заводской номер и т.д.). Многообразие спектральных приборов потребовало создания достаточно большого разнообразия корпусов.

Конструктивное исполнение линейки фотодиодов в виде кремниевого кристалла с гибким полиамидным шлейфом, обеспечивающим разъемное соединение линейки с электронной платой [3], позволило создать многокристалльные одно- и многорядные сборки с раз-

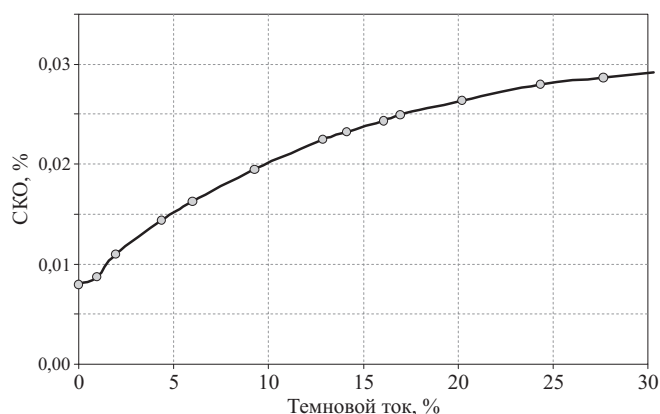


Рис. 2. Зависимость СКО выходного сигнала линейки фотодиодов типа БЛПП-369 от темнового тока

мещением линеек фотодиодов по поверхностям различной кривизны для оснащения спектрографов и квантометров. Во всех линейках сборки начало и окончание регистрации соответствующих им участков спектра происходит одновременно. Количество кристаллов (линеек) в сборке обычно составляет от 1 до 24. Общее количество фотодиодов в многокристалльной сборке может составлять 66000 и более, а полная длина чувствительной к излучению зоны превышать 40 см.

Основные типы многокристалльныхборок линеек фотодиодов представлены на рис. 3. Плоские многокристалльные сборки (см. рис. 3, а) используются для оснащения спектрографов с плоскими фокальными поверхностями и одномерной дисперсией, т.е. спектрографов, созданных для работы с фотопластинками (ИСП-28, ИСП-30, ДФС-8, ДФС-13, PGS-2 и др.). В вогнутых многокристалльных сборках (см. рис. 3, б) линейки расположены по линиям аппроксимации дуги отрезками, равными длине одиночного кристалла. Такие сборки предназначены для использования в квантометрах с вогнутыми фокальными поверхностями и одномерной дисперсией взамен ранее используемых в них ФЭУ (МФС-3, -4, -5, -6, -7, -8; ДФС-10; ДФС-36; ДФС-41; ДФС-44; ДФС-51 и т.п.). Многострочные многокристалльные сборки (см. рис. 3, в) предназначены для регистрации спектров в спектрографах со скрещенной дисперсией. Линейки размещены в несколько рядов (строк) таким образом, чтобы обеспечить регистрацию каждого из порядков спектра. При этом кристаллы располагаются в направлении дисперсии дифракционной решетки. Такие сборки имеют выпуклость в горизонтальном направлении и используются в спектрографах со скрещенной дисперсией типа СТЭ-1.

Варианты стыковки кристаллов линеек фотодиодов в многокристалльных сборках представлены на рис. 4. В сборках с зазорами размеры “мертвых” зон на стыках равны 0,76 мм, что составляет 2,4 % от регистрируемого спектра. Сборки без зазоров между фоточувствительными областями линеек (с “перехлес-

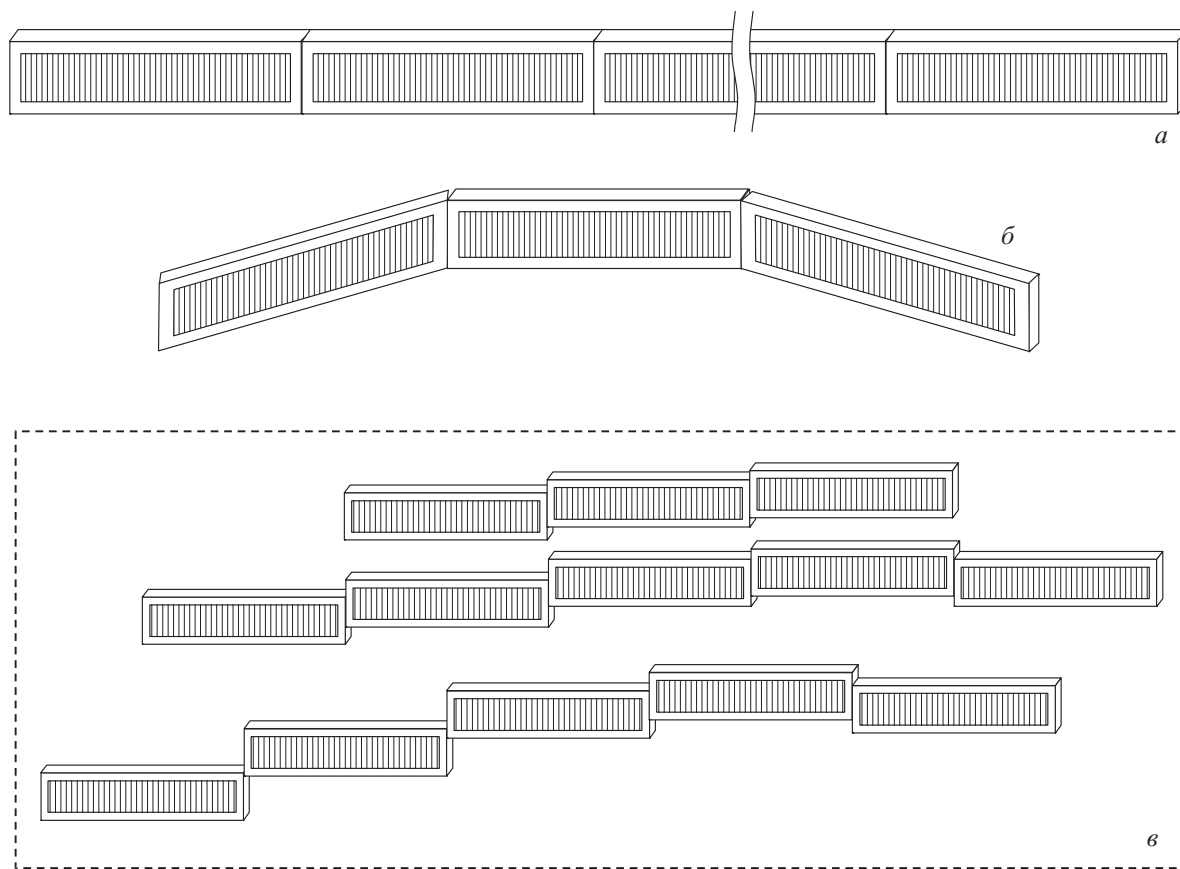


Рис. 3. Основные типы многокристалльных сборок линеек фотодиодов: *a* — плоские (5 и 8 кристаллов); *б* — вогнутые (5, 8, 10 и 12 кристаллов); *в* — многострочные (13 кристаллов)

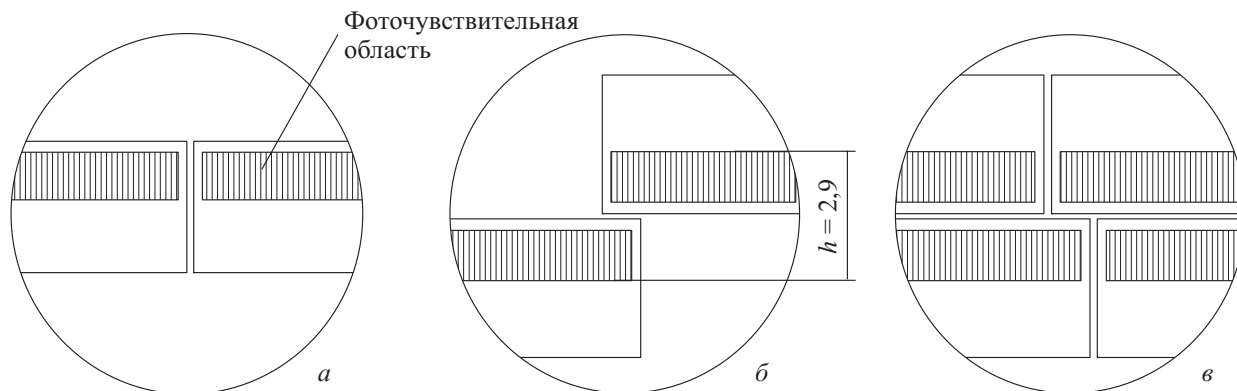


Рис. 4. Варианты стыковки кристаллов линеек фотодиодов в многокристалльных сборках: *a* — с зазорами 0,76 мм между фоточувствительными областями; *б* — без зазоров (с “перехлестом” фоточувствительных областей); *в* — двухстрочные

том”) и двухстрочные сборки для решения специальных задач атомно-эмиссионного спектрального анализа (например, для одновременной регистрации двух спектров) регистрируют свой рабочий спектральный диапазон без потерь. Для примера на рис. 5 представлен фрагмент двухстрочной плоской сборки. Необходимо отметить, что на основе линеек фотодиодов БЛПП-2Б, позволяющих регистрировать интенсивность линии аналита в динамическом диапазоне 10^6 , и линеек высокого разрешения БЛПП-2В с шагом раз-

мещения фотодиодов 6,25 мкм [3] разработаны только многокристалльные сборки с зазорами.

Параметры многокристалльных сборок для различных спектральных приборов приведены в таблице. Можно видеть, что радиус поверхности установки кристаллов в сборках изменяется от вогнутого +375 до выпуклого -872 мм, а количество кристаллов — от 1 до 24. Кроме того, из таблицы следует (см. четвертый столбец), что для регистрации областей спектра, необходимых для атомно-эмиссионного спектрального анализа, в приборах можно применять более одной

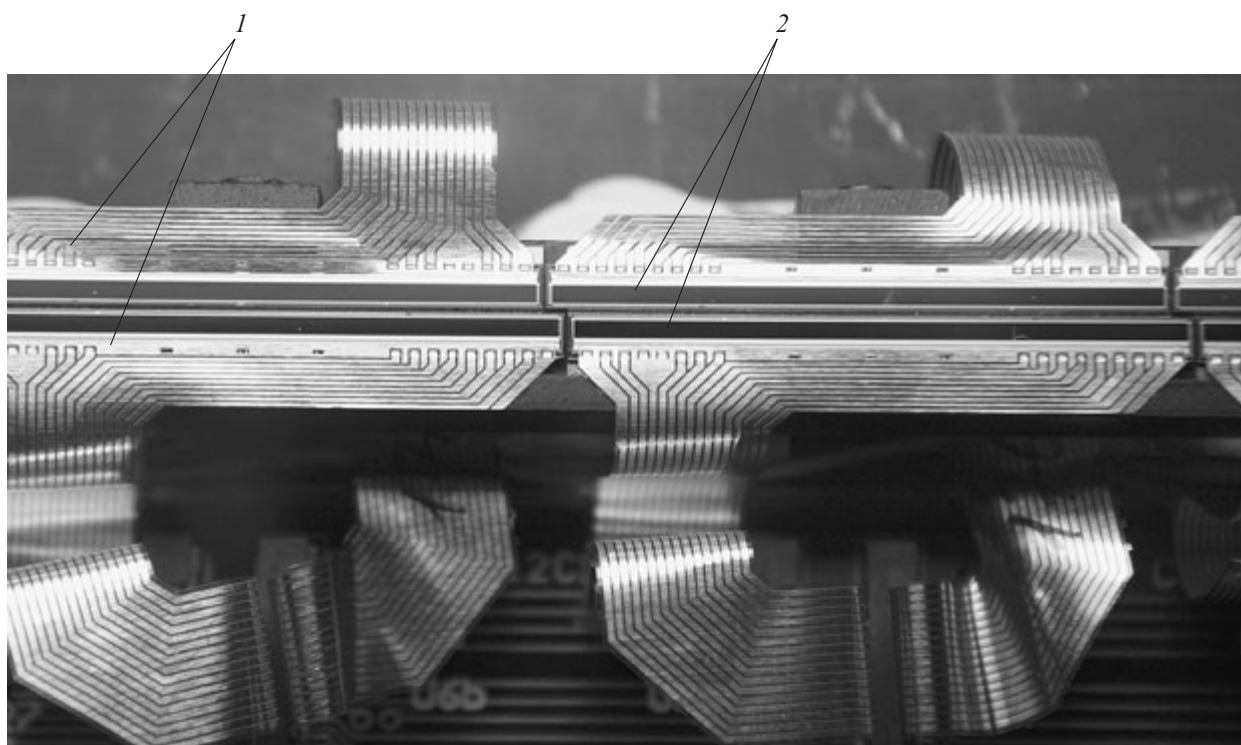


Рис. 5. Фрагмент двухстрочной плоской многокристальной сборки: 1 — полиамидные шлейфы; 2 — кристаллы линеек фотодиодов

сборки с различным количеством кристаллов. Так, например, в спектрометре “Гранд” (“ВМК-Оптоэлектроника”) используются две сборки с 12 и 5 или двухстрочные с 24 и 10 кристаллами. Сравнение основных характеристик многокристальных сборок с характеристиками сборок линейных детекторов других производителей проведено в работе [4]. Показано, что многокристальные сборки имеют на порядок выше динамический диапазон и в пять раз больший сбор фотонов за счет увеличенной высоты фотоячейки, что в совокупности с охлаждением и стабилизацией

температуры позволяет проводить высококачественное фотоэлектрическое преобразование оптического спектра в цифровую форму.

Тестирование многокристальных сборок проводится путем измерения и анализа их фотоэлектрических характеристик [3], которые записываются в файл, являющийся “паспортом” сборки. Располагая пополняемым время от времени “паспортом”, можно проследить за изменением характеристик сборки на протяжении всего времени эксплуатации. Таким путем, в частности, удалось зафиксировать увеличение

Параметры многокристальных сборок для различных спектральных приборов

Оптическая система спектрального прибора	Наименование спектрального прибора	Радиус многокристальной сборки, мм	Количество линеек	
			типа БЛПП-369 в сборках с зазорами и без зазоров*	БЛПП-2Б и БЛПП-2В в сборках с зазорами
Призменная	ИСП-28, -30	—	5	—
Черни–Тернера	ДФС-8	—	5	—
	ДФС-13	—	8	—
	PGS-2	—	8	12
Пашена–Рунге	SpectroLab	+375	12 + 5	—
	Atomcomp/ICAP	+375	12	—
	Гранд	+500	12 + 5	—
	Vaird	+500	12	—
	МФС-3, -4, -5, -6, -7, -8	+500	8 или 12	10
	ДФС-41, -51	+500	12 или 12 + 1	—
	ДФС-458	+520	10	—
	ДФС-44	+750	12 или 12 + 8 + 1	—
	ДФС-36	+1000	12 или 12 + 8 + 1	—
Со скрещенной дисперсией	СТЭ-1	-872	13	—

* В двухстрочных сборках количество линеек удваивается.

темнового тока линеек многокристалльных сборок в процессе их эксплуатации, что было связано с неконтролируемым поступлением внутрь корпуса влаги из-за недостаточной герметичности. С течением времени это приводило к выходуборок из строя. Улучшение герметичности корпуса многокристалльныхборок и его наполнение инертным газом избыточного давления резко повысило их надежность. Дегра-дация фотоэлектрических характеристик линеек в таких сборках не обнаружена.

Многокристалльные сборки нашли широкое применение в составе анализаторов МАЭС. Структурная схема, характеристики анализаторов, а также оптические схемы и параметры оснащаемых ими спектральных приборов приведены в работе [5]. В 2006 г. анализаторы МАЭС успешно прошли испытания в качестве средства измерения интенсивности спектральных линий на соответствие утвержденному в 2001 г. типу, зарегистрированному в Государственном реестре средств измерений под № 21013–01 с наименованием «Анализаторы многоканальные атомно-эмиссионных спектров МАЭС». Получены обновленные сертификаты сроком действия до 2011 г., допускающие применение анализаторов на территории Российской Федерации и Казахстана. Анализаторы МАЭС выпускаются серийно предприятием «ВМК-Оптоэлектроника», г. Новосибирск (лицензия Госстандарта № 000522-ИР от 18.07.2003 г. на изготовление и ремонт таких приборов как средств измерений). Предприятие имеет сертифицированную систему качества, удовлетворяющую требованиям ГОСТ Р ИСО 9001–2001 (соответствует международному стандарту ISO 9001:2000), внедренную в 2003 г. и прошедшую внешнюю проверку (аудит) в 2006 г. в связи с окончанием срока действия сертификата. По результатам этой проверки выдан новый сертификат со сроком до 2009 г. Метрологическая служба предприятия аккредитована на право поверки анализаторов МАЭС и информационно-измерительных комплексов с анализаторами для собственных нужд и сторонних организаций. Поверка анализаторов МАЭС осуществляет-

ся в соответствии с Методикой поверки, утвержденной Всероссийским научно-исследовательским институтом оптико-физических измерений (Москва), по заявкам заинтересованных организаций.

Таким образом, разработаны методы построения термостабилизированных многокристалльныхборок линеек фотодиодов (плоских, многострочных, по кругу Роуланда), в том числеборок без «мертвых» зон, позволившие создать ряд линейных детекторов оптического излучения (спектральный диапазон — 160–1100 нм, шаг размещения фотодиодов — 12,5 мкм, динамический диапазон — 10^4 , количество фотоячеек — до 62000 и более, длина фоточувствительной зоны — 40 см и более) для оснащения спектральных приборов, применяемых в атомно-эмиссионном анализе. В отличие от известных решений безкорпусные кристаллы линеек с односторонними полиамидными шлейфами размещены на едином термостабилизированном основании. Корпус сборки наполнен инертным газом с избыточным давлением. Многокристалльные сборки характеризуются высокой стабильностью фотоэлектрических и геометрических параметров. Они пригодны для решения большинства задач атомно-эмиссионного спектрального анализа. Более трехсотборок (в составе анализаторов МАЭС) используются в настоящее время в работе практически со всеми типами известных спектрографов и квантометров в России и за рубежом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Картер Д. / Аналитика и контроль. 2003. Т. 7. № 2. С. 112–119.
2. Лившиц А. М., Пелезнев А. В. / Оптика и спектроскопия. 1994. Т. 76. № 2. С. 363–368.
3. Лабусов В. А., Бехтерев А. В. / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. Специальный выпуск. 2007. Т. 73. С. 7–12.
4. Лабусов В. А., Попов В. И., Бехтерев А. В., Путьмаков А. Н., Пак А. С. / Аналитика и контроль. 2005. Т. 9. № 2. С. 104–109.
5. Лабусов В. А., Попов В. И., Путьмаков А. Н., Бехтерев А. В., Селюнин Д. О. / Аналитика и контроль. 2005. Т. 9. № 2. С. 110–115.