

- analysis of lithium compounds by flame photometry] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2012. Vol. 78. N 1. Part II. P. 90 – 94 [in Russian].
4. **Shabanova E. V., Zak A. A., Pogudina G. A., et al.** Ispol'zovanie spektrometra Kolibri-2 dlya opredeleniya Na, K, Li i Rb v geokhimicheskikh ob"ektakh [The Use of a Kolibri-2 Spectrometer in Determination of Na, K, Li and Rb in Geochemical Objects] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2015. Vol. 81. N 1. Part II. P. 98 – 104 [in Russian].
5. **Medvedev N. S., Kukarin V. F., Saprykin A. I.** Optimizatsiya uslovii élektrorazryadnogo otbora prob pri analize stalei i splavov metodom atomno-émisionnoi spektrometrii s induktivno svyazannoi plazmoi [Optimization of electro-discharge sampling in the analysis of steels and alloys by atomic emission spectrometry with inductively coupled plasma] / Analit. Kontrol'. 2011. Vol. 15. N 1. P. 38 – 46 [in Russian].

УДК 543.4,539.23,681.785.557

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ НЕРАБОЧИХ ПОРЯДКОВ СПЕКТРА В СПЕКТРОМЕТРАХ С ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ

© **З. В. Семенов¹, В. А. Лабусов^{1,2}, И. А. Зарубин^{1,2}, Г. В. Эрг³**

Статья поступила 25 октября 2016 г.

Представлен расчет конфигурации комбинированного оптического фильтра для подавления (отражения) излучения нерабочих порядков спектра в спектрометрах с дифракционной решеткой. Комбинированный фильтр состоит из подложки с нанесенными отрезающими светофильтрами на основе многослойных оптических покрытий. Расчет учитывает допуски на ширину спектральных переходов в спектрах фильтров и точность позиционирования фильтров на подложке. Рассчитан и изготовлен фильтр для подавления излучения нерабочих порядков дифракционного спектра, получаемого с помощью малогабаритного спектрометра «Колибри-2» с рабочим спектральным диапазоном 190 – 1100 нм. Созданный фильтр подавляет интенсивность излучения нерабочих порядков спектра не менее чем в $2 \cdot 10^4$ раз. Обнаружены артефакты в спектре, вызванные преломлением излучения на краях многослойных покрытий, и предложен способ уменьшения этого негативного эффекта.

Ключевые слова: фильтры порядков; отрезающие светофильтры; многослойные диэлектрические покрытия; контроль напыления; спектрофотометрия; тонкие пленки.

В настоящее время расширяется применение спектрометра «Колибри-2», созданного на основе плоской дифракционной решетки по оптической схеме Черни – Тернера, в методах эмиссионной фотометрии пламени, спектрофотометрии и других [1]. Известно, что в спектрометрах с дифракционными решетками наблюдаются спектры различных порядков [2] и возможно наложение на первый рабочий порядок дифракционного спектра, регистрируемого «Колибри-2», более высоких нерабочих порядков. Это происходит в спектрометрах с рабочим спектральным диапазоном $[\lambda_{\min}; \lambda_{\max}]$, если $2\lambda_{\min} < \lambda_{\max}$. Такое наложение делает сложным анализ зарегистрированных спектров — в линейчатых спектрах появляются линии нерабочих порядков, которые могут накладываться на аналитические линии, а в случае сплошных спектров работа вообще становится невозможной. Существует восемь вариантов исполнения спектрометра «Колибри-2» по рабочему спектральному диапазону и разрешению [3], включающие диапазоны с $2\lambda_{\min} < \lambda_{\max}$, а значит, присутствуют наложения порядков. Например, в спектрометре «Колибри-2» со спектральным диапазоном 190 – 1100 нм наряду с первым порядком спектра можно наблюдать спектры нерабочих порядков до пятого включительно, которые могут затруднять расшифровку спектров и вносить погрешности в проводимые измерения.

Одним из наиболее перспективных методов исключения попадания излучения нерабочих порядков дифракционного спектра на фоточувствительную поверхность линейки фотодетекторов в малогабаритных спектрометрах является установка перед ней отрезающих светофильтров на основе многослойных покрытий, которые отражают излучение в коротковолновой области и пропускают в длинноволновой (рис. 1). Если область отражения фильтра включает видимый диапазон длин волн, то такой фильтр также называют «холодным зеркалом». Данные фильтры представляют собой многослойные диэлектрические пленки, которые формируют необходимый спектр пропускания благодаря многолучевой интерференции внутри сло-

¹ Институт автоматики и электрометрии СО РАН, ООО «ВМК-Оптоэлектроника», г. Новосибирск, Россия; e-mail: info@vmk.ru

² Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия.

³ Институт лазерной физики СО РАН, г. Новосибирск, Россия.

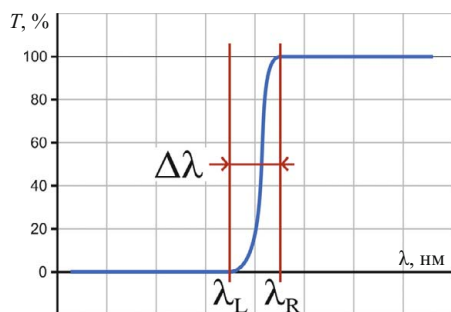


Рис. 1. Спектр пропускания отрезающего фильтра типа «холодное зеркало»

ев. Конфигурация из нескольких таких фильтров, установленная перед линейкой фотодетекторов, позволяет очистить спектр рабочего диапазона от излучения нерабочих порядков спектра.

Можно рассчитать конфигурацию (расположение и спектр пропускания) фильтров порядков для спектрометра «Колибри-2», которая позволила бы регистрировать спектры в рабочем диапазоне 190 – 1100 нм без наблюдения паразитного вклада излучения нерабочих порядков спектра. Принимая во внимание, что динамический диапазон линейки фотодетекторов «Колибри-2» составляет 10^4 , коэффициент пропускания фильтрами нерабочих порядков спектра должен составлять не более 10^{-4} (или 0,01 %).

Цель данной работы — ознакомить специалистов с результатами расчета и нанесения многослойных диэлектрических светофильтров для подавления излучения нерабочих порядков дифракционного спектра в малогабаритном спектрометре «Колибри-2».

Общий расчет конфигурации фильтров. Рассмотрим конфигурацию фильтров для спектрометра с рабочим спектральным диапазоном $[\lambda_{\min}; \lambda_{\max}]$ и первым (или минус первым) порядком спектра. Конфигурация фильтров состоит из наложенных друг на друга отрезающих фильтров (многослойных диэлектрических покрытий), которые имеют соответствующие спектры пропускания. Характерный спектр пропускания используемого отрезающего фильтра приведен на рис. 1. Такой фильтр характеризуется рабочим спектральным диапазоном, расположением спектрального перехода (λ_L и λ_R), его шириной $\Delta\lambda = (\lambda_R - \lambda_L)$, степенью подавления коротковолнового излучения и уровнем пропускания длинноволнового.

Конфигурация фильтров проектируется таким образом, чтобы излучение нерабочего порядка дифракционного спектра с длиной волны из диапазона $[\lambda_L - \lambda_R]$ попадало в другой пространственный участок фотоприемника и оказывалось подавлено другим фильтром. Благодаря этому форма перехода в спектре пропускания в интервале $[\lambda_L - \lambda_R]$ уже не важна.

Было решено использовать отрезающие фильтры, размещенные один над другим с перекрытием (как на рис. 2), а не последовательно. В этом случае от второго и последующих фильтров не требуется подавление

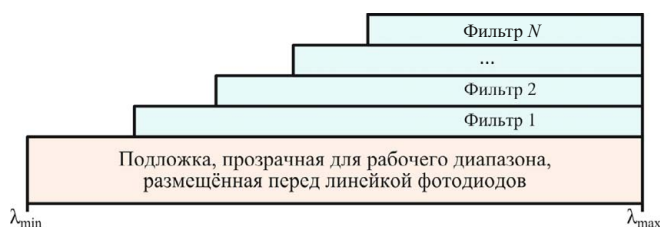


Рис. 2. Пространственная конфигурация комбинированного фильтра нерабочих порядков дифракционного спектра в общем случае

интенсивности для всего интервала $[\lambda_{\min}; \lambda_L]$, так как коротковолновую часть излучения этой области будут подавлять нижележащие фильтры. Благодаря этому такая конфигурация имеет существенное преимущество, так как снижает спектральные требования ко второму и последующим фильтрам.

Геометрическое пространство фотолинейки $[0; 32,25]$ мм можно взаимоднозначно сопоставить со спектральным диапазоном излучения рабочего порядка дифракции $[\lambda_{\min}; \lambda_{\max}]$. Установление такой взаимоднозначной связи называется *профилированием спектрометра*, его проводят вручную или в автоматическом режиме [4] с применением источника линейчатого спектра путем сопоставления зарегистрированного спектра и спектральных линий из базы данных. Благодаря такой взаимоднозначности в дальнейшем можно проводить расчеты в обоих пространствах и пересчитывать геометрические координаты расположения фильтров в спектральные, а расположения спектральных переходов в фильтрах переводить в геометрические места на фотолинейке. В дальнейшем под величиной ширины спектрального перехода и погрешностями позиционирования можно понимать как координату (в мм) на линейке фотодетекторов, так и длину волны излучения (рабочего порядка дифракции, в нм), падающего на соответствующую точку линейки фотодетекторов после прохождения дифракционной решетки.

Излучение с длиной волны меньше $\lambda_{\min}$ будем считать для задачи несущественным (отсутствующим), поскольку часто в качестве минимальной рабочей длины волны спектрометра используется нижняя граница фоточувствительности детектора (линейки фотодетекторов) или прозрачности среды (атмосферы). Если же чувствительность и прозрачность в данной области присутствуют, то всегда можно использовать отрезающий фильтр на входе в спектрометр.

В общем случае конфигурация состоит из N фильтров, и каждый из фильтров должен быть прозрачен для проходящего через него излучения первого (рабочего) порядка дифракционного спектра. Подложка, на которую наносят фильтры, должна быть прозрачна для излучения всего спектрального диапазона $[\lambda_{\min}; \lambda_{\max}]$. Для края каждого фильтра обозначим координату на линейке фотодетекторов x_n , а соответствующее значение в пространстве длин волн — λ_n , где n —

номер фильтра. Поскольку разместить фильтры относительно линейки фотодетекторов абсолютно точно невозможно, то в расчеты была добавлена погрешность позиционирования фильтра в конфигурации — Δx_n (т.е. позиция края фильтра известна с точностью $\pm \Delta x_n$). Для уменьшения количества нанесенных фильтров край каждого фильтра нужно располагать как можно дальше от начала фотолинейки, насколько это допустимо расчетом.

1. Рассмотрим первый участок на линейке фотодетекторов, от левого края линейки до начала первого фильтра (рис. 3). Он должен быть прозрачен для рабочего излучения $[\lambda_{\min}; \lambda_1]$.

2. Излучение с минимальной рассматриваемой длиной волны $\lambda_{\min}$ будет падать на фотолинейку во втором порядке в позицию $2\lambda_{\min}$, и первый фильтр это излучение должен подавить (отразить). Следовательно, на линейке фотодетекторов первый фильтр должен располагаться в координатах длин волн не дальше $2\lambda_{\min}$, а с учетом допуска на погрешность позиционирования — не дальше $2\lambda_{\min} - \Delta x_1$. При этом первый фильтр должен быть прозрачен для проходящего через него излучения рабочего порядка, что накладывает условие на правую границу спектрального перехода λ_R , после которого фильтр имеет пропускание, близкое к 100 %. Таким образом, первый фильтр в оптимальной конфигурации расположен на фотолинейке, начиная с $2\lambda_{\min} - \Delta x_1$ и имеет спектральный переход с координатами:

$$\lambda_{R1} = 2\lambda_{\min} - \Delta x_1;$$

$$\lambda_{L1} = \lambda_R - \Delta\lambda_1 = 2\lambda_{\min} - \Delta x_1 - \Delta\lambda_1.$$

3. Поскольку первый фильтр подавляет (отражает) все излучение с длинами волн $[\lambda_{\min}; \lambda_{L1}]$, то для следующих фильтров минимальная длина волны, которая может пройти в нерабочем порядке, — это $2\lambda_{L1} = 2(2\lambda_{\min} - \Delta x_1 - \Delta\lambda_1)$, что соответствует второму порядку. Это излучение должен подавить второй фильтр. Следовательно, на линейке фотодетекторов второй фильтр должен располагаться в координатах длин волн не дальше $2\lambda_{L1} = 2(2\lambda_{\min} - \Delta x_1 - \Delta\lambda_1)$, а с учетом допуска на погрешность позиционирования — не дальше $2(2\lambda_{\min} - \Delta x_1 - \Delta\lambda_1) - \Delta x_2$. При этом второй фильтр должен быть прозрачен для проходящего через него излучения рабочего порядка, что накладывает условие на правую границу спектрального перехода λ_R , после которого фильтр имеет пропускание, близкое к 100 %. Таким образом, второй фильтр в оптимальной конфигурации расположен на фотолинейке, начиная с $2(2\lambda_{\min} - \Delta x_1 - \Delta\lambda_1) - \Delta x_2$ и имеет спектральный переход с координатами:

$$\lambda_{R2} = 2(2\lambda_{\min} - \Delta x_1 - \Delta\lambda_1) - \Delta x_2;$$

$$\lambda_{L2} = \lambda_{R2} - \Delta\lambda_2 = 2(2\lambda_{\min} - \Delta x_1 - \Delta\lambda_1) - \Delta x_2 - \Delta\lambda_2.$$

4. Аналогично рассуждая для последующих фильтров с учетом соответствующих погрешностей

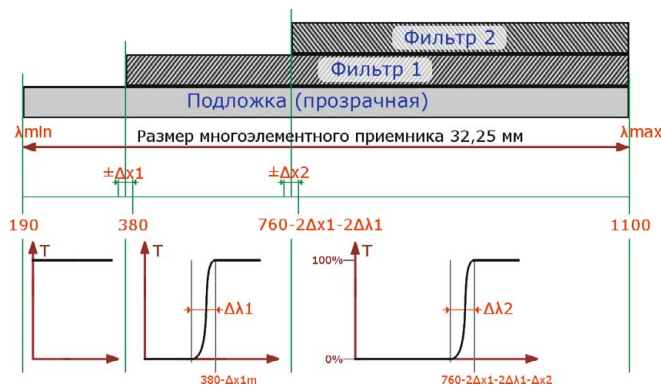


Рис. 3. Пространственная и спектральная конфигурации набора фильтров (Δx_i — погрешность позиционирования края фильтра; $\Delta\lambda_i$ — ширина спектрального перехода фильтра)

позиционирования и ширины спектрального перехода, найдем рекуррентное соотношение:

$$\lambda_{Rn} = 2(\dots 2(2\lambda_{\min} - \Delta x_1 - \Delta\lambda_1) - \Delta x_2 - \Delta\lambda_2 \dots) - \Delta x_{n-1} - \Delta\lambda_{n-1} - \Delta x_n,$$

$$\lambda_{Ln} = \lambda_{Rn} - \Delta\lambda_n = 2(\dots 2(2\lambda_{\min} - \Delta x_1 - \Delta\lambda_1) - \Delta x_2 - \Delta\lambda_2 \dots) - \Delta x_{n-1} - \Delta\lambda_{n-1} - \Delta x_n - \Delta\lambda_n.$$

Продолжая таким образом для последующих фильтров, можно записать условие оптимальной конфигурации, когда длина волны проходящего на последнем фильтре излучения наименьшего нерабочего порядка (второго) равна концу рабочего спектрального диапазона $\lambda_{\max}$:

$$\lambda_{\max} = 2(\dots 2(2(2\lambda_{\min} - \Delta x_1 - \Delta\lambda_1) - \Delta x_2 - \Delta\lambda_2) - \Delta x_3 - \Delta\lambda_3) \dots - \Delta x_N - \Delta\lambda_N). \quad (1)$$

Можно обратить внимание, что в итоговое уравнение (1) величины Δx_i и $\Delta\lambda_n$ всегда входят только в виде суммы $(\Delta x_i + \Delta\lambda_i)$. Это означает, что итоговые требования к этим характеристикам будут определяться только их суммой. Следовательно, уменьшая погрешность позиционирования, можно сделать более широкий спектральный переход и наоборот, получая более узкий спектральный переход, можно менее точно позиционировать край фильтра.

Из уравнения (1) также следует, что в идеальном случае при нулевых погрешностях размещения фильтров и нулевых ширинах спектральных переходов ($\Delta x_i = 0$ и $\Delta\lambda_n = 0$) для подавления излучения всех нерабочих порядков во всем рабочем спектральном диапазоне $[\lambda_{\min}; \lambda_{\max}]$ требуется использование не менее $N = [\log_2(\lambda_{\max}/\lambda_{\min})]$ фильтров (квадратными скобками обозначено взятие целой части). Для решения поставленной задачи использовать меньшее количество фильтров фиксированной толщины невозможно, большее — возможно, но избыточно.

Расчет для спектрометра «Колибри-2». Спектрометр «Колибри-2» имеет возможность смены рабочего диапазона путем замены дифракционной решетки.

Фильтр 1				
		в X, мм	в λ, нм	в диодах
λ_L	Начало перехода		310,32	
λ_R	Конец перехода		375,32	
$\Delta\lambda_1$	Ширина перехода	2,08	65,00	167
λ_1	Позиция на линейке	5,95	377,66	476
Δx_1	Точность позиционирования	0,15	4,68	12
Фильтр 2				
		в X, мм	в λ, нм	в диодах
λ_L	Начало перехода		550,00	
λ_R	Конец перехода		605,04	
$\Delta\lambda_2$	Ширина перехода	1,76	55,04	141
λ_2	Позиция на линейке	13,49	612,84	1079
Δx_2	Точность позиционирования	0,50	15,60	40

Рис. 4. Внешний вид электронной таблицы расчета параметров для фильтра порядков с результатом расчета для спектрометра «Колибри-2»

Диапазон 190 – 1100 нм является максимально широким из возможных, поскольку для излучения с длинами волн больше 1100 нм мала чувствительность линейки фотодетекторов, а излучение с длиной волны меньше 190 нм поглощается в атмосфере. Именно для этого диапазона была поставлена задача рассчитать и создать комбинированный фильтр. Для работы комбинированного фильтра во всем рабочем диапазоне 190 – 1100 нм требуется как минимум два отрезающих фильтра:

$$N = \left\lceil \log_2 \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} \right\rceil = \left\lceil \log_2 \frac{1100}{190} \right\rceil = [2,53] = 2. \quad (2)$$

Если задачу удастся решить с применением двух фильтров, то это будет теоретический минимум для такого способа и такого спектрального диапазона.

Для случая $N = 2$ уравнение (1) будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} \lambda_{\max(N=2)} &= 2[2(2\lambda_{\min} - \Delta x_1 - \Delta \lambda_1) - \Delta x_2 - \Delta \lambda_2] = \\ &= 8\lambda_{\min} - 4\Delta x_1 - 4\Delta \lambda_1 - 2\Delta x_2 - 2\Delta \lambda_2. \end{aligned} \quad (3)$$

Пространственная и спектральная конфигурации набора фильтров для такого случая изображены на рис. 3. Используются два многослойных покрытия, нанесенных на прозрачную для излучения всего рабочего диапазона $[\lambda_{\min}; \lambda_{\max}]$ подложку. Под каждым пространственным участком набора фильтра изображен спектр пропускания всего набора.

Для нахождения оптимальной конфигурации фильтров требуется варьировать все члены уравнения, сохраняя условие уравнения (3) для поиска компромисса между сложностью изготовления каждого из фильтров и возможной точностью позиционирования фильтра. На основании данного расчета была создана электронная таблица в ПО LibreOffice Calc (рис. 4), которая связала анализируемые параметры, сохраняя условие уравнения (3). Таблица позволяет задавать входные параметры фильтра порядков (отмеченные красным цветом) и находить выходные параметры (отмеченные зеленым цветом). Входными параметрами

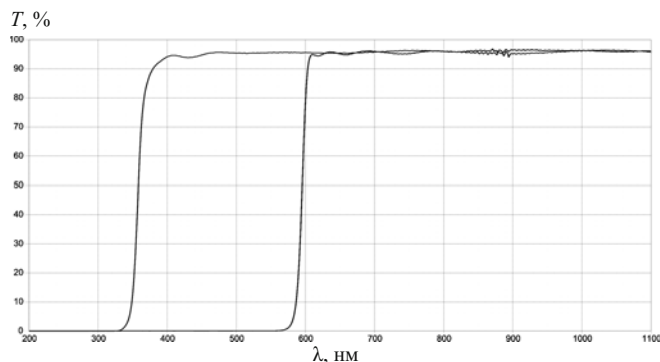


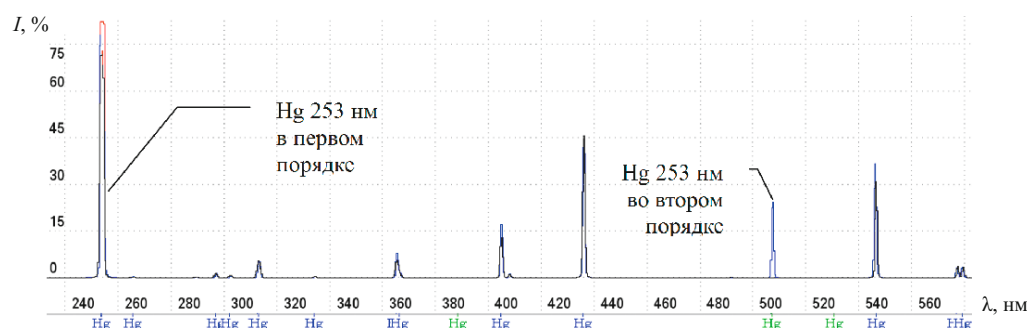
Рис. 5. Спектры пропускания созданных отрезающих фильтров в рассчитанной конфигурации

являются точность позиционирования фильтров на линейке и ширина перехода первого фильтра. Дополнительными входными данными являются: рабочий спектральный диапазон спектрометра (190 – 1100 нм), размер фотолитки (32,25 мм), количество фотодетекторов (2580 шт). Выходные параметры — положения спектральных переходов, ширина перехода второго фильтра и положение фильтров на линейке.

Было предложено еще одно техническое решение для улучшения результата. В связи с тем, что подложка несколько длиннее необходимого размера и возможно ее перемещение относительно линейки фотодетекторов, путем точной юстировки (установки подложки с фильтрами и ее юстировки с наблюдением спектра пропускания) можно компенсировать погрешность расположения одного из краев фильтров почти полностью. В случае двух фильтров это означает, что погрешность установки одного из них можно считать достаточно малой, а главную роль играет погрешность расстояния между краями фильтров. С учетом этого и возможностей напылительной установки был предложен итоговый расчет конфигурации, представленный на рис. 4. В конфигурации присутствуют два фильтра с шириной спектрального перехода 65 и 55 нм. При этом погрешность позиционирования первого фильтра составляет всего 0,15 мм, а второго — 0,50 мм.

В соответствии с данным расчетом положений фильтров, допусков по их позиционированию, ширин и расположений спектральных переходов провели моделирование и синтез многослойных покрытий в ПО OptiLayer [5]. С помощью вакуумной установки, оснащенной системой спектрального контроля в широком спектральном диапазоне [6], на подложку были нанесены комбинированные фильтры из двух отрезающих фильтров (с применением материалов Nb_2O_5 , SiO_2 и MgF_2). Спектры пропускания фильтров показаны на рис. 5. Степень подавления излучения в коротковолновой области таких покрытий составила 10^5 и $2 \cdot 10^4$ для первого и второго фильтров соответственно, что полностью решает проблему паразитных порядков дифракционного спектра в спектрометре «Колибри-2».

Рис. 6. Обзорные спектры ртутной лампы, зарегистрированные без использования (синий) и с использованием (черный) фильтра порядков



Для демонстрации работы фильтра на рис. 6 показаны обзорные спектры ртутной лампы, зарегистрированные с использованием фильтра порядков и без него. Как видно из рисунка, использование фильтра позволяет отсекал паразитные линии нерабочих порядков. Эффективность работы фильтра демонстрирует рис. 7. На рис. 7, *а* показана линия ртути 253,65 нм, зарегистрированная при экспозиции 10 мс, а на рис. 7, *б* — эта же линия во втором порядке, зарегистрированная при экспозиции 1 с с применением фильтра. Видно, что интенсивность линии во втором порядке с учетом разницы в экспозиции ниже более чем в $2 \cdot 10^4$ раз.

При регистрации спектрометром «Колибри-2» спектра непрерывного источника излучения были обнаружены артефакты на границах отсекающих фильтров, показанные на рис. 8. Ширина таких артефактов при размещении фильтров в «Колибри-2» составила около 50 фотодетекторов, что соответствует 15 нм в регистрируемых спектрах. В качестве частичного решения проблемы фотоячейки в данной области могут быть не представлены в спектре в обычном режиме работы спектрометра.

Причина наличия таких артефактов заключается в том, что границы отсекающих фильтров при их нанесении получаются не отвесно-вертикальными, а наклонными, и образуются маленькие треугольные призмы с характерным размером, равным толщине фильтра (порядка 100 нм). Такие микропризмы меняют ход лучей в параллельном пучке, проходящем через фильтр, что приводит к переносу некоторой интенсивности излучения из коротковолновой области спектра в длинноволновую.

Для уменьшения этого негативного эффекта можно использовать большее количество фильтров в конфигурации (например, три). Применение дополнительного фильтра, излишнего с точки зрения расчета оптимальной конфигурации, увеличивает количество краев фильтров и, соответственно, таких артефактов на один, но позволяет снизить спектральные требования по ширине спектрального перехода каждого из фильтров. В этом случае многослойные покрытия проще получить, также можно уменьшить общую физическую толщину каждого из фильтров и, соответственно, размер призм, дающих артефакты.

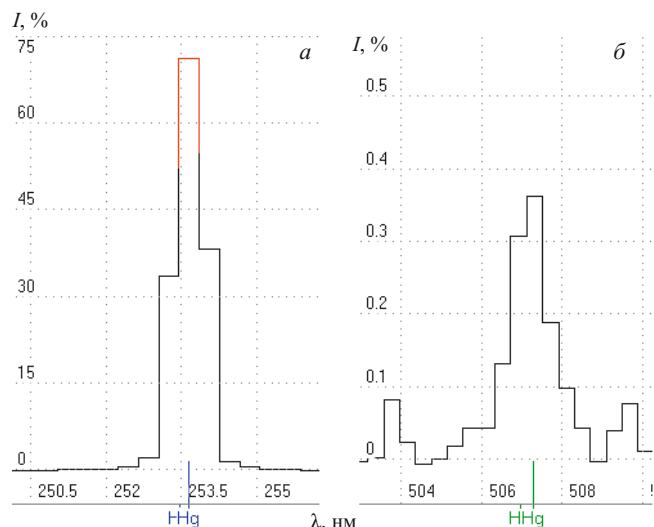


Рис. 7. Спектральная линия ртути 253,65 нм, зарегистрированная спектрометром «Колибри-2»: *а* — первый порядок спектра; *б* — второй порядок спектра

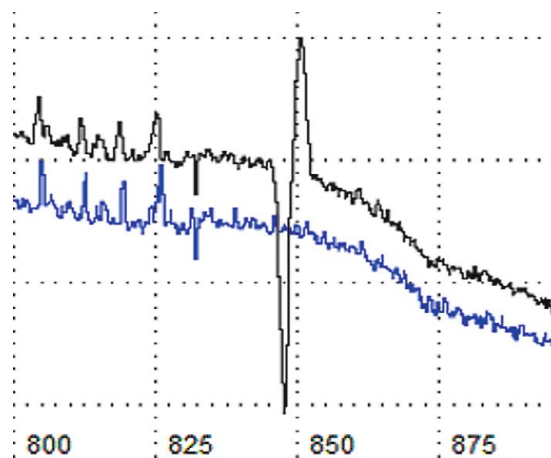


Рис. 8. Артефакт в зарегистрированном спектре (черный — с фильтром, синий — без фильтра)

Таким образом, в общем виде рассчитаны геометрическая и спектральная конфигурации многослойных диэлектрических светофильтров для подавления излучения нерабочих порядков дифракционного спектра в спектрометрах с дифракционной решеткой. Рассчитан и изготовлен фильтр для подавления излучения нерабочих порядков дифракционного спектра малогабаритного спектрометра «Колибри-2»

с рабочим спектральным диапазоном 190 – 1100 нм. Степень подавления излучения нерабочих порядков полученного фильтра — не менее чем в $2 \cdot 10^4$ раз. Решена задача работы спектрометра «Колибри-2» с рабочим диапазоном 190 – 1100 нм в первом порядке спектра без наложения других порядков дифракции. Предложен способ уменьшения артефактов в спектре, возникающих на пространственных границах фильтров, путем замены расчетной конфигурации покрытия на конфигурацию с тремя спектральными фильтрами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зарубин И. А., Гаранин В. Г., Лабусов В. А. Применение малогабаритного спектрометра «Колибри-2» в атомно-эмиссионном анализе / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 1. Ч. II. С. 86 – 89.
2. Пейсахсон И. В. Оптика спектральных приборов. Изд. 2-е, доп. и перераб. — Л.: Машиностроение, 1975. — 312 с.
3. Зарубин И. А. Возможности малогабаритного спектрометра «Колибри-2» в атомно-эмиссионном спектральном анализе / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 1. Ч. II. С. 114 – 117.
4. Панкратов С. В., Лабусов В. А., Неклюдов О. А., Ващенко П. В. Автоматическая градуировка спектрометров с анализаторами МАЭС по длинам волн (профилирование) / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 1. Ч. II. С. 128 – 134.

5. Furman Sh. A., Tikhonravov A. V. Basics of optics of multilayer systems. — Gif-sur-Yvette: Editions Frontiers, 1992. — 242 p.
6. Лабусов В. А., Семенов З. В., Зарубин И. А. и др. Система спектрального контроля нанесения многослойных диэлектрических покрытий / Измерительная техника. 2013. № 12. С. 11 – 14.

REFERENCES

1. Zarubin I. A., Garanin V. G., Labusov V. A. Primenenie malogabaritnogo spektrometra «Kolibri-2» v atomno-émissionnom analize [The use of small-sized spectrometer “Kolibri-2” in the atomic-emission analysis] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2012. Vol. 78. N 1. Part II. P. 86 – 89 [in Russian].
2. Peisakhson I. V. Optika spektral'nykh priborov [Optics of spectral instruments]. 2nd Edition. — Leningrad: Mashinostroenie, 1975. — 312 p. [in Russian].
3. Zarubin I. A. Vozmozhnosti malogabaritnogo spektrometra «Kolibri-2» v atomno-émissionnom spektral'nom analize [Capabilities of a Kolibri-2 compact spectrometer in atomic emission spectral analysis] / Zavod. Labor. Diagn. Mater. 2017. Vol. 83. N 1. Part II. P. 114 – 117 [in Russian].
4. Pankratov S. V., Labusov V. A., Neklyudov O. A., Vashchenko P. V. Avtomaticheskaya graduirovka spektrometrov s analizatorami MAÉS po dlinam voln (profilirovanie) [Automatic wavelength calibration of the spectrometers with MAES analyzers (profiling)] / Zavod. Labor. Diagn. Mater. 2017. Vol. 83. N 1. Part II [in Russian].
5. Furman Sh. A., Tikhonravov A. V. Basics of optics of multilayer systems. — Gif-sur-Yvette: Editions Frontiers, 1992. — 242 p.
6. Labusov V. A., Semenov Z. V., Zarubin I. A. i dr. Sistema spektral'nogo kontrolya naneseniya mnogoslownykh diélektricheskikh pokrytii [A system for the spectral monitoring system of the deposition of multilayer dielectric coatings] / Izmerit. Tekhn. 2013. N 12. P. 11 – 14 [in Russian].

УДК 543.423

ОДНОЛИНЗОВАЯ СИСТЕМА ОСВЕЩЕНИЯ ВХОДНОЙ ЩЕЛИ ВАКУУМНОГО СПЕКТРОМЕТРА «ГРАНД-ЭКСПЕРТ»

© Д. Н. Бокк^{1,2}, В. А. Лабусов^{1,2,3}, И. А. Зарубин^{1,2,3}, В. Г. Гаранин^{2,4}

Статья поступила 4 октября 2016 г.

Рассмотрены преимущества применения однолинзовой системы освещения входной щели в вакуумном спектрометре «Гранд-Эксперт» по сравнению с трехлинзовой. Показано, что для выбора аналитического промежутка можно использовать диафрагму, расположенную в искровом штативе, продуваемом аргоном. Экспериментальным путем определен рабочий диапазон давления остаточных газов в вакуумном корпусе прибора. Показана возможность расширения рабочего спектрального диапазона спектрометра «Гранд-Эксперт» в область вакуумного ультрафиолета до 130 нм.

Ключевые слова: атомно-эмиссионный спектральный анализ; анализ сталей и сплавов; анализатор МАЭС; спектрометр «Гранд-Эксперт».

Экспрессное определение состава металлов и сплавов на каждой стадии их производства является важным элементом системы контроля качества продукции

предприятия. Часто решение о соответствии сплава производственным требованиям должно быть принято в течение 3 – 5 мин, а задержки ведут к финансовым потерям.

Вакуумный спектрометр «Гранд-Эксперт» позволяет выполнять элементный анализ сплавов на основе железа (сталей и чугунов), алюминия и меди (бронзы и латуни) [1]; специальных сплавов на основе титана, алюминия и магния [2]; и сплавов на основе других

¹ Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Россия; e-mail: bokk@vmk.iae.nsk.su

² ООО «ВМК-Оптоэлектроника», г. Новосибирск, Россия.

³ Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия.

⁴ Конструкторско-технологический институт вычислительной техники СО РАН, г. Новосибирск, Россия.