

Сравнительный анализ аппроксимирующих функций для спектральных характеристик серийных светофильтров

В. А. СЕРГЕЕВ*, В. Н. РОГОВ**, А. В. УЛЬЯНОВ**

* Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Ульяновский филиал, Россия, e-mail: sva@ulstu.ru

** Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

Рассчитаны погрешности, возникающие при аппроксимации спектральных характеристик серийных светофильтров типа BPF функциями различного вида, такими как Гаусса, рациональные, полиномы четных степеней. Наименьшая погрешность получена при аппроксимации сплайнами малых (1—3) порядков, построенными на выборке, взятой из табличных данных светофильтров.

Ключевые слова: светофильтр, аппроксимация спектральных характеристик, сплайны.

The errors of approximation of serial BPF type light filters spectral characteristics by different type functions such as Gaussian, rational, etc. are calculated. The least error is obtained at approximation by small (1—3) orders splines built on sampling taken from light filter table data.

Key words: light filter, approximation of spectral characteristics, splines.

При разработке оптоэлектронных устройств часто возникает необходимость фильтрации светового потока светофильтрами с заданной спектральной характеристикой [1—7]. Точность методов и алгоритмов обработки оптических сигналов зависит от погрешности аппроксимации спектральных характеристик реальных светофильтров модельной функцией. Широкое применение в измерительной практике находят светофильтры с гауссовой спектральной характеристикой [2, 3]. Однако в спецификациях серийных светофильтров оценки отклонения реальных характеристик от аппроксимирующей функции не приведено.

В статье оценены погрешности аппроксимации функциями различного вида спектральных характеристик $T(\lambda)$ серийных светофильтров типа BPF 600\80-G и BPF 660\80-G с гауссовыми спектральными характеристиками. В табл. 1 сведены параметры светофильтров [4]. К исследуемым светофильтрам прилагаются акты выходного контроля в табличном и графическом виде, в которых изображена $T(\lambda)$, полученная на спектрофотометре Cary-50 (рис. 1). Табличные данные светофильтров содержат n точек ($n = 121$) на интервале аппроксимации 400—1000 нм с шагом по длине волны $\Delta\lambda = 5$ нм. Для практического использования такое задание $T(\lambda)$ слишком грубо.

Таблица 1

Параметры светофильтров

Параметр спектральной характеристики светофильтра	Тип светофильтра	
	BPF 600\80-G	BPF 660\80-G
Центральная длина волны, нм	600 ± 6	660 ± 7
Полоса пропускания $\Delta\lambda_{0,5}$, нм	80 ± 12	80 ± 14
Максимальный коэффициент пропускания T , %, более	60	55
$\Delta\lambda_{0,1}$, нм, менее	152	213
$\Delta\lambda_{0,001}$, нм, менее	240	390
Угол падения луча, °	± 12	± 12
Световая апертура, %	80	85

Данные табл. 1 позволяют найти функцию, аппроксимирующую спектральные характеристики светофильтров с наименьшим средним квадратическим отклонением (СКО) на интервале задания $T(\lambda)$. Параметры оптимальных аппроксимирующих функций определяли в среде MathCAD при помощи встроенной функции Genfit.

Аппроксимация функцией Гаусса. Функция Гаусса — одна из наиболее удобных и широко используемых на практике аппроксимирующих функций:

$$f_G(\lambda) = \frac{T_G}{\sqrt{2\pi}\sigma_G} \exp\left[-(\lambda - \lambda_G)^2 / (2\sigma_G^2)\right].$$

Ее подбирали по трем параметрам: коэффициенту пропускания T_G в максимуме, ширине полосы σ_G и центральной

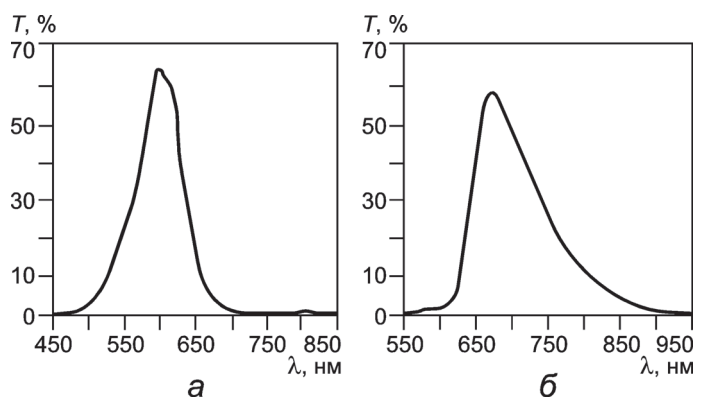


Рис. 1. Графики спектральной характеристики для разных полосовых светофильтров:

а — BPF 600\80-G; б — BPF 660\80-G

длине волны λ_G пропускания. В табл. 2 приведены параметры оптимальных аппроксимирующих функций и СКО, рассчитанное на интервале аппроксимации по формуле:

$$СКО_G = \sqrt{\sum_{i=1}^n (f_{Gi} - \tau_i)^2 / (n-1)},$$

где f_{Gi} — значение аппроксимирующей функции, τ_i — табличное значение спектральной характеристики $T(\lambda)$ светофильтра в точке i .

Таблица 2

Параметры оптимальной гауссовой функции для двух типов светофильтров

Параметр	Тип светофильтра	
	BPF 600\80-G	BPF 660\80-G
T_G , %	51,6	64,7
σ_G , нм	33,9	48,8
λ_G , нм	596,9	694,8
$СКО_G$, %	2,1	5,6

Аппроксимация полиномом. В качестве аппроксимирующей функции можно выбрать полином четной степени вида

$$f_P(\lambda) = \sum_{k=0}^m a_k (\lambda_P - \lambda)^k,$$

где λ_P — центральная длина волны полосы пропускания; m — четное число в силу квазисимметричности $T(\lambda)$ относительно λ_P .

В этом случае точность аппроксимации будет повышаться с увеличением степени полинома, что, в свою очередь, может привести к неоправданно высоким затратам вычислительных ресурсов при обработке оптических сигналов в конечном изделии. В связи с этим оценку точности аппроксимации выполняли для полиномов 2, 4 и 6 степеней. Результаты расчета $СКО_P$ представлены в табл. 3.

Таблица 3

Погрешность аппроксимации $T(\lambda)$ полиномами различных степеней

Параметр	Тип светофильтра					
	BPF 600\80-G			BPF 660\80-G		
Степень полинома	2	4	6	2	4	6
$СКО_P$, %	12,2	6,2	3,1	13,2	9,1	5,3

Аппроксимация рациональной функцией. Подбор функции

$$f_R(\lambda) = T_R / \left[1 + (\lambda - \lambda_R)^2 / \sigma_R^2 \right]$$

осуществляли по трем параметрам: коэффициенту пропускания T_R , центральной длине волны λ_R и ширине σ_R полосы пропускания фильтра. Результаты расчетов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Параметры оптимальной рациональной функции

Параметр	Тип светофильтра	
	BPF 600\80-G	BPF 660\80-G
T_R , %	66,5	57,5
σ_R , нм	31,8	46,7
λ_R , нм	597,6	689,8
$СКО_R$, %	3,6	5,9

Аппроксимация сплайнами. Из определения и математического смысла сплайна следует, что сплайновые функции соединяют все используемые экспериментальные точки гладкими кривыми. При аппроксимации $T(\lambda)$ по всем экспериментальным точкам среднее квадратическое отклонение $СКО_S$ аппроксимирующей кривой будет равно нулю. Отсюда следует, что при аппроксимации сплайнами для достижения такой же точности, как и при аппроксимации другими функциями, можно использовать не все, а лишь часть экспериментальных точек. Для оценки погрешности аппроксимации сплайнами экспериментальных характеристик светофильтра расчеты проведены с использованием лишь каждой N -й точки характеристики $T(\lambda)$. При этом $СКО_S$ рассчитывали по всей совокупности экспериментальных точек. В качестве аппроксимирующей функции использовали сплайны в виде линейного, квадратичного и кубического полиномов. Для всех трех видов сплайнов при одинаковом числе пропущенных экспериментальных точек расчеты показали одинаковое значение $СКО_S$. На рис. 2 приведен график зависимости $СКО_S$ от числа N пропущенных точек при сплайнировании; видно, что чем больше экспериментальных точек пропускается, тем больше погрешность аппроксимации, и наоборот. Расчеты показали, что при аппроксимации $T(\lambda)$ сплайнами уже по каждой пятой точке экспериментальной характеристики, $СКО_S$ становится меньше 1 %: для BPF 600\80-G — 0,9 % и для BPF 660\80-G — 0,6 %. Следовательно, получаем существенный выигрыш в точности по сравнению с другими аппроксимирующими функциями (см. табл. 2—4) и возможность использования в пять раз меньше экспериментальных точек. Значит, применение аппроксимации сплайнами позволяет без потери точности снизить в пять раз трудоемкость при измерении спектральных характеристик светофильтров, сократить объем необходимой памяти для хранения коэффициентов аппроксимирующих функций и уменьшить влияние иных погрешностей (сбоев), связанных с обращением к памяти, обработкой данных при выполнении измерений и пр.

Приведенные результаты позволили сделать следующие выводы. Реальная спектральная характеристика серийных светофильтров значительно отличается от гауссовой, особенно для светофиль-

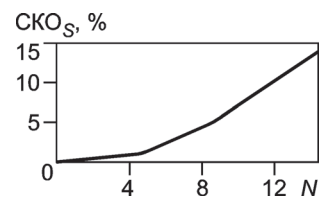


Рис. 2. График зависимости $СКО_S$ от числа N пропущенных точек при аппроксимации спектральных характеристик сплайнами

ра BPF 660\80-G. Поэтому аппроксимация $T(\lambda)$ гауссовой кривой приведет к заметным погрешностям в оптоэлектронных устройствах [4—7]. Наилучшее приближение к реальным спектральным характеристикам дает сплайн-аппроксимация, где выигрыш в точности достигается уже при использовании каждой пятой точки табличной характеристики светового фильтра. При аппроксимации сплайнами невозможно составить аналитические выражения, удобные для теоретического анализа, но при обработке измерительной информации при помощи микроконтроллера или персонального компьютера сплайн-аппроксимация, записанная в памяти компьютера, не приводит к дополнительным трудностям.

Л и т е р а т у р а

1. **Конюхов Н. Е., Леонович Г. И., Матюнин С. А.** Оптоэлектронные цифровые преобразователи перемещений с интерферометрическими элементами коррекции и обработки оптических сигналов // Приборы и системы управления. 1990. № 9. С. 18—20.
2. **Кузьмин В. Н., Антонов В. В., Круглов О. В.** Приборы для измерения оптических параметров и характеристик светодиодов // Полупроводниковая светотехника. 2010. № 3. С. 26—31.

3. **Матюнин С. А., Леонович Г. И.** Использование функций Гаусса для аппроксимации передаточных функций многокомпонентных оптронных структур // Нано- и микросистемная техника. 2001. № 9. С. 7.

4. **Baumeister Philip W.** Optical Coating Technology. Bellingham, Washington (USA): SPIE PRESS, 2004.

5. **Рогов В. Н., Ульянов А. В.** Устройство измерения цветности светодиодов // Радиоэлектронная техника: Межвуз. сб. науч. трудов. Ульяновск: УлГТУ, 2011. С. 92—95.

6. **Рогов В. Н., Ульянов А. В.** Фотоприемные устройства для исследования цветности излучения светодиодов // Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем: Труды науч.-практ. конф. Ульяновск, 2011. С. 203—205.

7. **Сергеев В. А., Рогов В. Н., Ульянов А. В.** Методические погрешности определения параметров спектра светодиодов двумя фотоприемниками // Измерительная техника. 2013. № 4. С. 42—44; **Sergeev V. A., Rogov V. N., Ul'yanov A. V.** Systematic errors when determining the parameters of the spectrum of light-emitting diodes using two photoreceivers // Measurement Techniques. 2013. V. 56. N 4. P. 415—420.

Дата принятия 18.07.2013 г.

620.193.01:669

Волоконно-оптическая спектроскопия для контроля процессов электроокислирования металлов

В. А. КОТЕНЕВ, А. Ю. ЦИВАДЗЕ

Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН, Москва, Россия
e-mail: kotenev@phych.ac.ru

Представлен метод исследования фазово-неоднородных металл-оксидных поверхностных слоев при помощи волоконно-оптического спектрометра. Коэффициенты отражения металла на разных длинах волн обрабатываются модифицированными к рефлектометрии алгоритмами оптической спектротомографии, что позволяет контролировать толщину и химический состав неоднородных поверхностных слоев. Дан пример расчета параметров оксидных пленок на поверхности сплава Fe-18Cr, обработанного при печном и электроконтактном нагреве.

Ключевые слова: неоднородные металл-оксидные поверхностные слои, оксидные пленки, толщина и химический состав, волоконно-оптическая спектроскопия, нанотомография.

The method for study of phase-heterogeneous metal-oxide surface layers by means of fiber optics spectrometers is presented. The metal reflection coefficients for different wavelengths are processed by modified to reflectometry optical spectrotomography algorithms. This modification allows to control the thickness and chemical composition of heterogeneous surface layers. An example of calculation of parameters of oxide films on the surface of Fe-18Cr processed at furnace and electrocontact heating is given.

Key words: heterogeneous metal-oxide surface layers, oxide films, thickness and chemical composition, fiber optics spectroscopy, nanotomography.

Диагностика толщины и химического состава неоднородных фазовых слоев и поверхностных пленок в сложных физико-химических системах — одна из традиционных задач оптического и спектрального исследования поверхности материалов в тех или иных условиях окружающей среды [1].

Особое значение имеют рутинные исследования значительного количества однотипных образцов, выдержанных в разных условиях, особенно в процессах формирования неоднородных поверхностных слоев [2]. При этом часто необходимо определить среднюю толщину и оценить химический со-