

**УДК 621.385.12: 621.385.64:
621.385.8**

Ю.П. Мачехин, докт. техн. наук,
Т.И. Фролова, канд. физ. - мат. наук,
Ю.А. Шунькова, асп.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ АППАРАТНОЙ ФУНКЦИИ СПЕКТРОАНАЛИЗАТОРА ПРИ РАСЧЕТЕ ЦВЕТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ СЕРНЫХ СВЧ-ЛАМП

Введение

Создание источников света и исследование их характеристик излучения связано с корректной оценкой цветовых параметров спектра. Технически эти измерения можно осуществить с помощью таких измерительных устройств, как колориметры. Эти приборы существуют двух типов. Первый построен по принципу выделения чистых спектральных цветов из спектра излучения с помощью четырех фильтров, полоса пропускания которых соответствует установленным спектральным формам, по которым вычисляют координаты цвета излучения.

Второй тип приборов построен по принципу вычисления координат цвета из формы спектральной кривой измеренного спектра излучения. Эта возможность позволяет использовать любой спектральный прибор, обеспечивающий измерение спектра излучения либо в абсолютных, либо в относительных единицах.

При изучении новых источников естественного света, спектр которых приближен к солнечному, наиболее продуктивным является процесс исследования цветовых характеристик с помощью спектральных приборов. В этой связи представляет большой интерес изучение влияния характеристик спектрального прибора на точность вычисления координат цвета и цветности.

Этот вопрос неоднократно обсуждался в литературе, в настоящей статье он нашел дальнейшее развитие в связи с использованием на выходе спектрального прибора регистрирующей ПЗС линейки. В первую очередь появилась необходимость уточнения влияния аппаратной функции на регистрацию спектра излучения, как он искажается под воздействием измерительного прибора.

1. Аппаратные искажения в спектре

Исследования проводились при следующих условиях:

1. Регистрирующая система должна быть линейна, т.е. реакция системы на сумму сигналов определяется равной суммой реакций на каждый из них в отдельности.
2. Обеспечение инвариантности прибора, т.е. аппаратные искажения не будут зависеть от абсолютных значений t , а только от их разности (в спектроскопии достаточно, чтобы это условие выполнялось в пределах исследуемой спектральной линии).

Тогда сигнал на выходе системы есть свертка сигнала на входе и некоторой характеризующей свойства прибора функции $g(t)$, называемой аппаратной функцией или импульсным откликом прибора:

$$f_{\text{вых}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{\text{вх}}(t)g(t'-t)dt \quad \text{или} \quad f_{\text{вых}}(t) = f_{\text{вх}}(t)*g(t). \quad (1)$$

По физическому смыслу аппаратная функция – результат действия прибора на δ -образный сигнал на входе (см. рис. 1). В спектроскопии – спектр, регистрируемый прибором, когда на вход его подано монохроматическое излучение. Аппаратная функция – основная теоретическая характеристика прибора, определяемая физическим принципом его функционирования и параметрами [1].

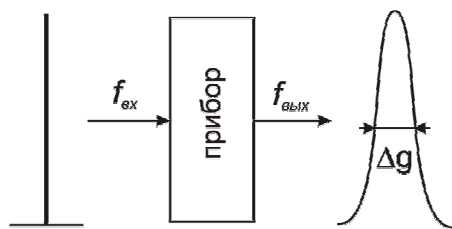


Рис. 1 – Реакция измерительного прибора на поданный на его вход δ -импульс

Ширина аппаратной функции Δg – расстояние между точками, где $g(t)$ составляет половину максимального значения или обращается в 0 (для различных приборов это определение несколько отличается) принимается за разрешаемый спектральный интервал $\delta\lambda$, но аппаратная функция содержит более полную информацию о приборе, чем разрешающая способность.

2. Исследование влияния аппаратных искажений измерительного прибора на спектр излучения СВЧ-лампы

Рассмотрим влияние аппаратной функции спектроанализатора на световые и цветовые характеристики излучения серной СВЧ-лампы, основанной на молекулярном излучении серы, спектр которого очень близок к солнечному свету, а также к спектральной характеристике человеческого глаза, что положительно влияет на восприятие человеком цвета и общую световую чувствительность глаза. Спектр излучения таких ламп лежит преимущественно в видимой области спектра с цветовой температурой от 4000 К до 8000 К [2–4].

Из теории измерений известно, что если ширина сигнала намного больше ширины аппаратной функции, то $f_{\text{вх}}(t)$ можно считать практически постоянной в области, где $g(t'-t)$ отлична от нуля. Учитывая, что $g(t)$, как правило, нормируется на 1 по площади, получаем $f_{\text{вых}}(t) \approx f_{\text{вх}}(t)$, т. е. аппаратные искажения незначительны, ими можно пренебречь. Обобщая этот случай, можно отметить, что аппаратные искажения игнорируют, если детали в исходном сигнале намного больше разрешающей способности прибора.

Учитывая тот факт, что спектр излучения рассматриваемой серной СВЧ-разрядной лампы лежит в диапазоне 380–750 нм и является сплошным, проанализируем при каких значениях аппаратной функции измерительного прибора в спектре излучения лампы будут искажения.

В общем случае аппаратные искажения можно смоделировать при помощи интегрального уравнения (1). Широко известный способ решения уравнений такого

рода – использование теоремы о свертке. Фурье-образ результата свертки равен произведению Фурье-образов компонентов свертки:

$$\Phi[f_{\text{вых}}]=\Phi[f_{\text{вх}}]\Phi[g], \quad (2)$$

где Φ – интегральное преобразование Фурье. Функцию-результат преобразования Фурье $F(w)=\Phi[f(t)]$ называют Фурье-образом (а ее модуль – спектром) и рассчитывают следующим образом:

$$F(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot e^{-iwt} dt \quad (3)$$

Очевидно, что искомым выходной сигнал может быть получен следующим образом:

$$f_{\text{вых}} = \Phi^{-1}[\Phi[f_{\text{вх}}]\Phi[g]], \quad (4)$$

где $f(t)=\Phi^{-1}[F(w)]$ – обратное преобразование Фурье:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(w) \cdot e^{iwt} dw \quad (5)$$

В работе рассматривалось влияние 5 различных величин аппаратной функции на сигнал: $\Delta g = 0,1$ нм, 1 нм, 5 нм, 10 нм и 50 нм (см. рис.2).

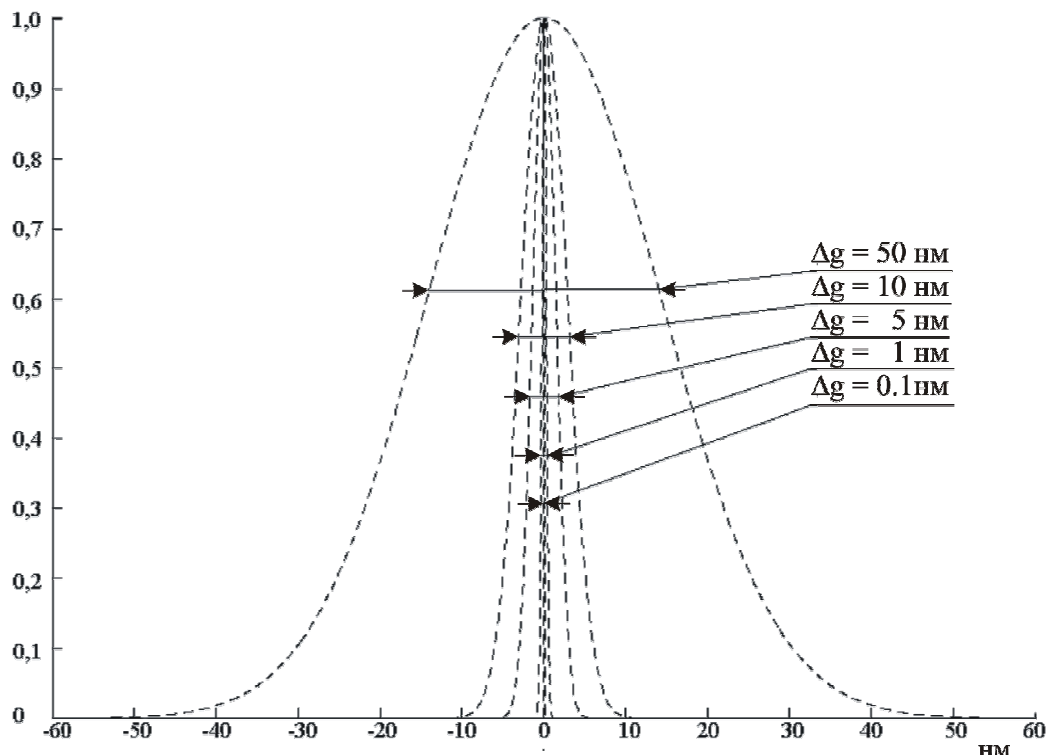


Рис. 2 – Аппаратная функция

С помощью формул (2) – (5) рассчитаем для серной СВЧ-лампы сигнал на выходе спектроанализатора. Исходный спектр, а также выходные сигналы приведены на рис. 3. Как видно, искажения в спектре излучения лампы появляются при $\Delta g = 50$ нм, особенно значительны искажения в области пика и на краях спектра, где детали в исходном сигнале соизмеримы разрешающей способности прибора.

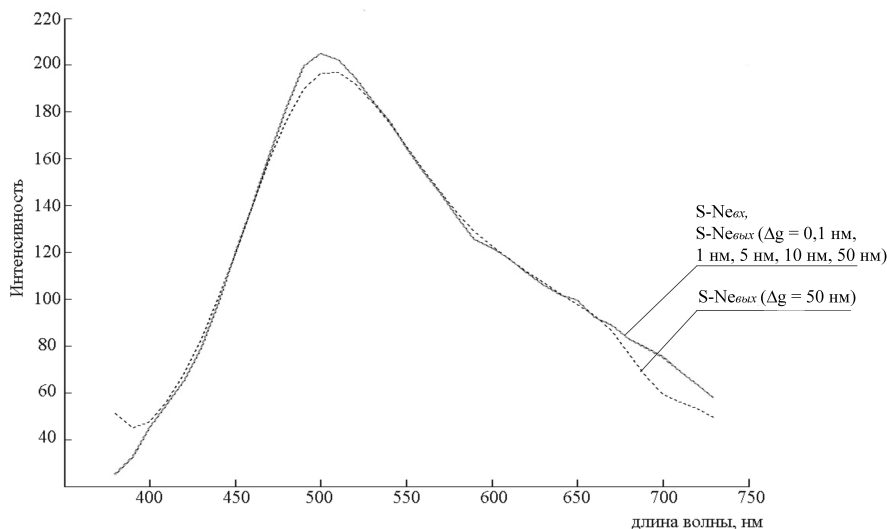


Рис. 3 – Спектр излучения серной СВЧ-лампы до и после измерения спектроанализатором

Так как спектр сложного излучения состоит из суммы чистых спектральных цветов, анализируем, как влияют искажения в спектре излучения на его колориметрические характеристики. Для этого выразим графически зависимость количеств основных цветов в спектре излучения источника света соответствующих его монохроматическим составляющим с учетом их интенсивностей от длины волны этого излучения (так называемые кривые сложения цветов). Рассмотрим исходный спектр СВЧ-лампы, а также спектр лампы, измеренный прибором с $\Delta g = 50$ нм (см. рис. 4).

На рисунке \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} соответствуют красной, зеленой и синей составляющей спектра. Как видно в спектре излучения серной лампы, прошедшем через спектроанализатор, несколько увеличена интенсивность красного цвета и незначительно уширена синяя составляющая, из-за чего на графике цветового пространства (рис. 5) область цвета серной лампы сдвигается несколько ближе к белому цвету излучения.

Цвет излучения источников света преимущественно характеризуется его цветовыми координатами. В табл. 1 приведены расчетные значения координат цвета и цветности для серной лампы в системах МКО XYZ и $L^*a^*b^*$ до и после измерения спектроанализатором с $\Delta g = 50$ нм, рассчитанные по формулам из [5, 6].

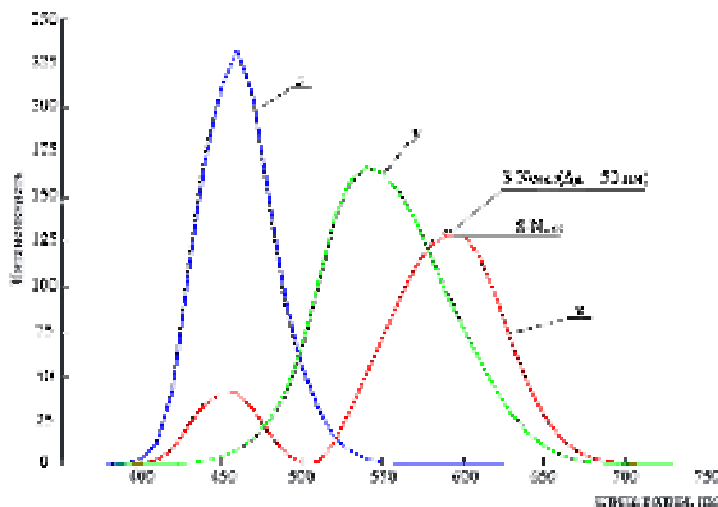


Рис. 4 – Кривые сложения спектра излучения серной СВЧ-лампы до и после измерения спектроанализатором с $\Delta g = 50$ нм

Таблиця 1

Параметр	Исходный спектр серной СВЧ-лампы		Спектр серной СВЧ-лампы после измерения спектрометром с $\Delta g = 50$ нм	Отклонение от исходного спектра, %
	X	Y	Z	
Координаты цвета в системе МКО XYZ	X	81,54	82,26	0,009
	Y	100	100	0
	Z	81,84	82,22	0,005
Координаты цвета в системе МКО Lab	L*	92,37	92,69	0,003
	a*	-32,88	-31,50	0,042
	b*	12,92	12,63	0,022
Координаты цветности	x	0,31	0,31	0
	y	0,38	0,378	0,005

Графическое представление координат цвета дает нам области цвета излучения источников света на графике цветового пространства. На практике удобнее использовать трехмерное пространство системы МКО Lab, так как оно очень эффективно решило проблему разработки равноконтрастного цветового пространства, а также описание цвета в этой системе фактически моделирует процесс представления цвета аппаратом человеческого зрения (рис. 5).

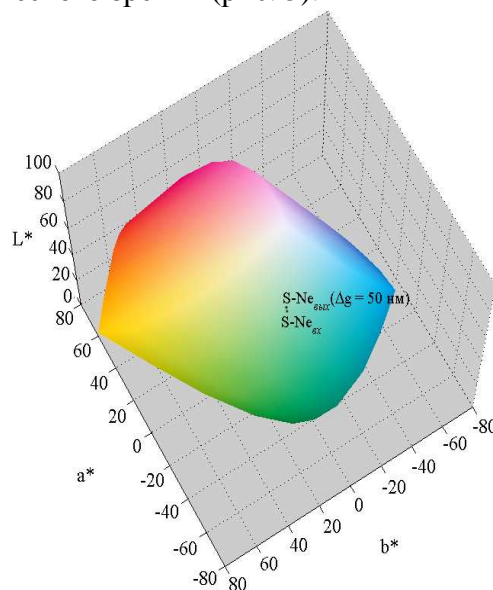


Рис. 5. Цветовое пространство источников излучения

График наглядно демонстрирует, что излучение исследуемой серной СВЧ-лампы лежит вблизи белой области цветности, но имеет доминирующую зеленую составляющую. При измерении интенсивности излучения лампы спектроанализатором с аппаратной функцией равной 50 нм, спектр излучения претерпевает незначительные изменения (добавляется небольшое количество красного цвета: $X_{60\text{нм}} - X_{60\text{нм}} = 0,725$), вследствие чего цвет спектра становится немного светлее и приобретает более желтый оттенок, однако человеческому глазу такие изменения будут незаметны.

Выводы

В работе было исследовано изменение спектральных и цветовых характеристик излучения серной СВЧ-разрядной лампы в зависимости от величины аппаратных

искажений измерительного прибора (спектроанализатора) и определено, что изменения в спектре лампы появляются лишь при ширине аппаратной функции равной 50 нм, так как детали в исходном сигнале становятся соизмеримы разрешающей способности прибора. Изменения цветовых характеристик лампы при этом незначительны и человеческий глаз их воспринимать не будет.

Таким образом, использование спектроанализаторов на основе ПЗС-линейки, имеющих ширину аппаратной функции не более 1 нм, для количественной и качественной оценки спектра излучения серных ламп, полностью удовлетворяет вышеописанным требованиям. К таким измерительным приборам относится волоконно-оптический спектрометр Thorlabs SPx-USB со спектральным разрешением <1 нм, который позволяет одновременно регистрировать протяженный участок спектра в диапазоне длин волн 400–900 нм, что исключает аппаратные искажения при регистрации спектра излучения серных СВЧ-ламп.

Литература

1. Аппаратные искажения: моделирование, исключение <http://plasma.karelia.ru/distort/index.ru.phtml>.
2. Диденко А. Н., Зверев Б. В. СВЧ-энергетика. М.: Наука, 2000. 262 с.
3. Юшков Д. Д. Источники света на основе безэлектродного СВЧ-разряда (обзор) // Светотехника, 1984. № 2. С. 33 – 39.
4. Рохлин Г. Н. Разрядные источники оптического излучения (обзор развития) // Светотехника, 1995. № 4. С. 34 – 51.
4. Луизов А. В. Цвет и свет. Л. Энергоатомиздат, 1989. 256 с.
5. Мачехин Ю. П., Фролова Т. И., Старчевский Ю. Л., Грищенко Ю. А. Спектральные и цветовые характеристики безэлектродных СВЧ-ламп // Прикладная радиоэлектроника, 2009. Т. 8. № 1. С. 75 – 80.
6. Мачехин Ю. П., Фролова Т. И., Грищенко Ю. А. Исследование спектра излучения безэлектродной серной лампы // Світлотехніка та електроенергетика, 2009. № 3. С. 46 – 49.

ВРАХУВАННЯ ВПЛИВУ АПАРАТНОЇ ФУНКЦІЇ СПЕКТРОАНАЛІЗАТОРА ПРИ РОЗРАХУНКУ КОЛІРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЕКТРУ ВИПРОМІНЮВАННЯ СІРЧАНИХ СВЧ-ЛАМП

Ю. П. Мачехін, Т. І. Фролова, Ю. О. Шунькова

У статті розглядається вплив апаратної функції спектрального вимірювального приладу на оцінку колірних характеристик сірчаних СВЧ-розрядних ламп. Реалізація поставленого завдання направлена на вивчення спектру сірчаної лампи як джерела білого світла. Досліджується зміна як спектральних, так і колірних характеристик випромінювання сірчаної лампи.

ACCOUNT OF INFLUENCE OF INSTRUMENTAL DISTORTIONS OF SPECTROANALYZER OF COLOUR CHARACTERISTICS CALCULATION OF SULPHUR MICROWAVE LAMPS RADIATED SPECTRUM

Y. P. Machekhin, T. I. Frolova, Y. A. Shunkova

The influence of instrumental distortions of measuring device on spectrum characteristics of the sulfur microwave discharge lamps is observed in the paper. Realization of the assigned task is directed on the study of spectrum of sulphur lamp as a source of white light. Changes in both spectral and color characteristics of the sulfur lamp radiation are investigated.