

ся около 20 с. Длительность процесса разложения определяет сложное интегрирование, которое описывает кристаллическую составляющую спектра (2)–(4). Разложение и вывод данных без учета кристаллической составляющей происходит практически мгновенно. Результаты разложения в виде графиков и необходимых данных выводятся на лицевую панель программы, что позволяет быстро получать информацию о структуре исследуемых материалов. Также удобный дизайн лицевой панели программы позволяет сократить время на подготовку данных к представлению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Campbell L. H., Fauchet P. M. The effects of microcrystal size and shape on the one phonon Raman spectra of crystalline semiconductors // Solid State Commum. 1986. Vol. 58, № 10. P. 739.
2. Bustarret E., Hachicha M. A., Brunel M. Experimental determination of the nanocrystalline volume fraction in silicon thin films from Raman spectroscopy // Appl. Phys. Lett. 1988. Vol. 52, № 20. P. 1675.
3. Спектры рамановского рассеяния и электропроводность тонких пленок кремния со смешанным аморфно-нанокристаллическим фазовым составом: определение объемной доли нанокристаллической фазы. / В. Г. Голубев, В. Ю. Давыдов, А. В. Медведев и др. // ФТТ. 1997. Vol. 39, № 8. P. 1348.
4. Raman characterization of the structural evolution in amorphous and partially nanocrystalline hydrogenated silicon thin films prepared by PECVD. / Zhi Li, Wei Li, Yadong Jiang et al. // J. Raman Spectrosc. 2011. Vol. 42. P. 415–421.
5. Основы золь-гель-технологии нанокомпозитов / А. И. Максимов, В. А. Мошников, Ю. М. Таиров, О. А. Шилова. 2-е изд. СПб.: ООО «Техномедиа» / Элмор? 2008. 255 с.
6. Левицкий В. С., Максимов А. И., Землякова С. Ю. Исследование каталитических материалов, полученных методом золь-гель-технологии, в системе Si–Co–O // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. Вып. 9. С. 23–32.
7. Nanostructured materials obtained under conditions of hierarchical self-assembly and modified by derivative forms of fullerenes / I. E. Gracheva, V. A. Moshnikov, S. S. Karpova and E. V. Maraeva // J. Non-Cryst. Solids. 2012. T. 358, № 2. P. 433–439.

V. S. Levitskii

THE PROCESSING OF THE RAMAN SPECTRA OF AMORPHOUS AND MICROCRYSTALLINE SILICON

This paper investigates handling features of the Raman spectra of amorphous and microcrystalline silicon. Program was designed in the Labview programming package and was successfully developed and tested on the experimental Raman spectra of crystalline and amorphous components. The coefficients of the expansion, as well as a comparison of the coefficients of expansion to the real physical properties of materials and structures based on amorphous and microcrystalline silicon was done.

The Raman spectrum, amorphous and microcrystalline silicon, solar cells

УДК 535.651

**Р. В. Юдин, Д. К. Кострин,
Д. И. Шишов, А. А. Ухов**

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ

Рассмотрена коррекция спектральной характеристики оптического спектрометра. Показано влияние различных методов цифровой фильтрации сигнала на качества получаемого спектра излучения. Исследована воспроизводимость колориметрических измерений светоизлучающих диодов при применении цифровой фильтрации сигнала.

Светоизлучающий диод, спектрометр, фильтрация сигнала, колориметрические измерения

Основной задачей колориметрии является определение цветовых координат по известному спектру излучения объекта. Задача определения колориметрических параметров самосветящихся объектов является гораздо менее сложной, чем такая же задача в отноше-

нии несамосветящихся объектов. В первом случае регистрируется непосредственно спектр излучения самого объекта. Для определения колориметрических параметров несамосветящихся объектов необходимо иметь источник освещения с заранее известным спектральным распределением интенсивности излучения.

Полупроводниковый светоизлучающий диод (СИД) является типичным самосветящимся объектом, имеющим близкое к гауссовому спектральное распределение интенсивности излучения. Исключением являются светодиоды со встроенным люминофорным слоем (например, белые светодиоды), которые имеют несимметричную форму спектра.

Определение цвета излучения по известному спектральному составу может быть выполнено, если принять во внимание, что каждое излучение является смесью большого числа монохроматических излучений и что координаты цвета смеси равны суммам координат цветов смешиваемых компонентов [1]. В системе *XYZ* все спектральные излучения имеют положительные координаты, так что расчет цвета сложного излучения значительно упрощается по сравнению с такими системами, как *RGB*.

Прежде чем приступить к анализу источников оптического излучения для повышения точности получаемых результатов, следует нормировать спектральную характеристику используемого прибора, т. е. ввести поправочную (компенсирующую передаточную) функцию. Спектральная чувствительность прибора в целом представляет собой комбинацию спектральных характеристик отдельных элементов оптической схемы и определяется: во-первых, передаточной функцией вводного оптического волокна, во-вторых, характеристикой диспергирующего устройства (дифракционной решетки) и, в-третьих, спектральной чувствительностью фотоприемника.

Для учета описанных факторов можно провести спектральную коррекцию характеристики прибора с помощью программы *Aspect*, разработанной в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» для управления оптическими спектрометрами. Для осуществления спектральной коррекции следует с помощью корректируемого прибора снять спектр эталона *A* с вычитанием темнового спектра. Далее необходимо подключить в программу подготовленный идеальный спектр эталона *A* (т. е. спектр в том виде, в каком он должен был бы наблюдаться с помощью спектрометра, если бы у него не было своей нелинейной спектральной зависимости). В дальнейшем, используя эти два спектра (реальный и идеальный), программа рассчитывает поправочную функцию, на которую автоматически домножаются все получаемые спектры.

В случае использования спектрометра для качественного анализа линейчатых спектров нормировка спектральной характеристики прибора не является необходимым требованием. Однако при использовании прибора в качестве спектрофотометра нормировка является обязательным условием. В случае проведения колориметрических измерений источников излучения описанная нормировка также способна улучшить достоверность получаемых результатов. На рис. 1 приведены спектры излучения белого СИД с учетом и без учета нормировки (2 и 1 соответственно). Спектральная коррекция позволила увеличить интенсивность сигнала (*I*) на тех длинах волн (λ), где спектральная чувствительность прибора ослаблена (область 500...590 нм на рис. 1).

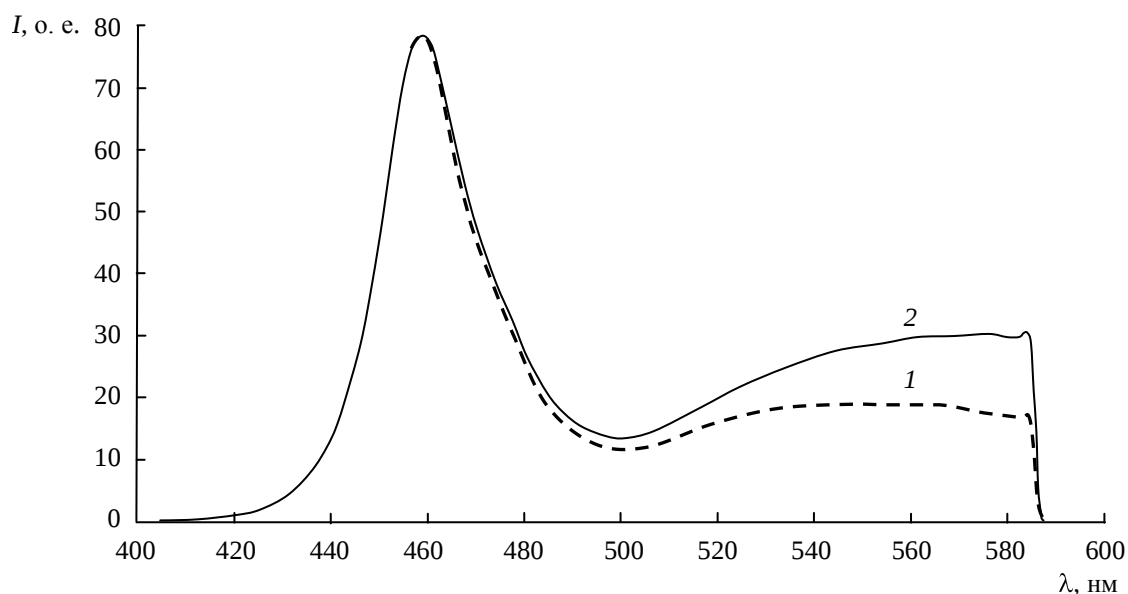


Рис. 1

Очевидно, что модификация формы сигнала приведет к изменению цветовых характеристик спектра. В табл. 1 приведены значения доминирующей длины волны ($\lambda_{\text{дом}}$), пиковой длины волны ($\lambda_{\text{пик}}$), а также цветовых координат x и y для двух образцов СИД до и после нормировки прибора.

Таблица 1

Тип СИД	$\lambda_{\text{дом}}$, нм	$\lambda_{\text{пик}}$, нм	x	y
Синий, до нормировки	481.6	478.8	0.104	0.166
Синий, после нормировки	482.5	479.2	0.103	0.178
Белый, до нормировки	482.4	457.8	0.189	0.235
Белый, после нормировки	487.1	458.5	0.210	0.290

Видно, что нормировка приводит к существенному сдвигу доминирующей длины волны и, соответственно, к изменению цветовых координат. Существенно повысить точность и воспроизводимость результатов измерений позволяет применение методов цифровой фильтрации данных, получаемых с помощью спектрометра.

На рис. 2, а показан фрагмент спектра, полученный с помощью программы Asprest и не подвергшийся дополнительной обработке. Сигнал фотоприемника на основе прибора с зарядовой связью (ФПЗС) имеет некоторый уровень шума, состоящего из нескольких компонентов. Первый компонент – это «геометрический» шум, обусловленный топологией фотоприемника. Для упрощения вывода сигнала в данном типе ФПЗС используются транспортные регистры по обе стороны фотоприемника [2].

Таким образом, четные и нечетные пиксели имеют несколько различные параметры. В рассматриваемом в данной статье спектрометре на 1 нм спектрального диапазона приходится примерно 5 пикселей и при спектральном разрешении 1.5 нм возможно усреднение между четными и нечетными пикселями без потери разрешения. В режиме удаления геометрического шума будет производиться линейная интерполяция четных и нечетных пикселей, а итоговый сигнал будет выглядеть следующим образом (рис. 2, б).

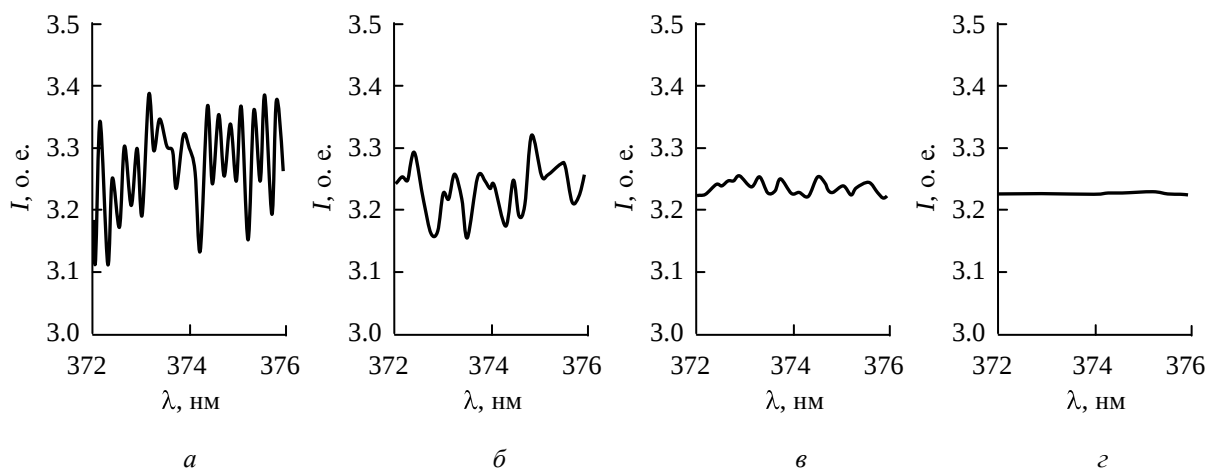


Рис. 2

Следующий компонент – это собственный шум ФПЗС. Для его снижения можно произвести усреднение по нескольким снятым спектрам (рис. 2, в). При значениях чувствительности прибора (времени накопления заряда ФПЗС) порядка 10 мс можно увеличить число усреднений до 50...100 (общее время измерения 0.5...1 с). При снятии «стационарных» спектров, например спектра эталонного источника, рекомендуется увеличить число усреднений, даже если при этом существенно возрастет время измерения. В любом случае общее время измерения примерно равно произведению времени накопления на чувствительность, плюс время передачи спектра в ПК.

Для спектров без узкополосных линий, например спектров излучения СИД, достаточно эффективным является пропускание полученных данных спектрального распределения излучения через сплайновый цифровой фильтр [3]. Вес фильтра задает «глубину» фильтрации – чем больше вес, тем меньше уровень шума. Вес 1 уже достаточно хорошо сглаживает результат (рис. 2, г).

При измерении параметров светодиодов можно дополнительно убрать влияние фонового сигнала вблизи уровня нуля. Для этого в программе Aspect необходимо выбрать режим обрезки спектра по уровню. При этом при проведении цветовых измерений значение сигнала менее выбранного будет обнуляться.

Оптический спектрометр должен производить цветовые измерения с высокой точностью и воспроизводимостью результатов. Допустимое отклонение определения цветовых координат при контроле параметров СИД на производстве составляет 0.001...0.002. Это означает, что прогретый прибор при многократном определении координат цветности высокостабильного источника излучения должен выдавать результаты, отличающиеся друг от друга не более чем на 0.1–0.2 %. Такой результат достижим только при условии высокой стабильности всей измерительной системы, термостатирования ФПЗС, наличия фильтрации шумов. На рис. 3 приведено окно «Цветовые измерения» программы Aspect, используемой при контроле параметров СИД на ЗАО «Светлана-Оптоэлектроника».

В окне программы (рис. 3) приведена диаграмма цветового пространства CIE 1931 (локус цветов). По периметру локуса размещаются спектральные цвета максимальной насыщенности. Их, как известно, семь – фиолетовый, синий, голубой, зеленый, желтый, оранжевый и красный. Четких границ между спектральными цветами нет, и они плавно переходят друг в друга, порождая более ста различных глазом оттенков. На левом конце «подковы» находится фиолетовый цвет, а на правом – красный. Замыкает локус прямая,

проведенная между этими концами. На этой прямой расположены пурпурные цвета, не входящие в спектр. Неспектральными являются также и все цвета, лежащие внутри локуса. Локус вместе с линией пурпурных цветов охватывает все цвета, воспринимаемые человеческим глазом. Точки на диаграмме цветности, лежащие вне локуса, не соответствуют реальным цветам и потому не представляют интереса для колориметрии. Цветовые координаты исследуемого СИД отмечены на локусе окружностью, а результаты их вычислений приведены в правом верхнем углу окна программы (рис. 3).

Для подтверждения эффективности описанных методов фильтрации были проведены эксперименты по воспроизводимости результатов колориметрических измерений. Эксперименты проводились для нескольких образцов светодиодов синего, зеленого, красного и белого цветов. Перед началом цикла измерений для устранения эффекта саморазогрева полупроводникового кристалла [4] каждый СИД прогревался в течение примерно 10 мин, после чего снимались цветовые координаты излучения в количестве 100 отсчетов с интервалом 3...5 с.

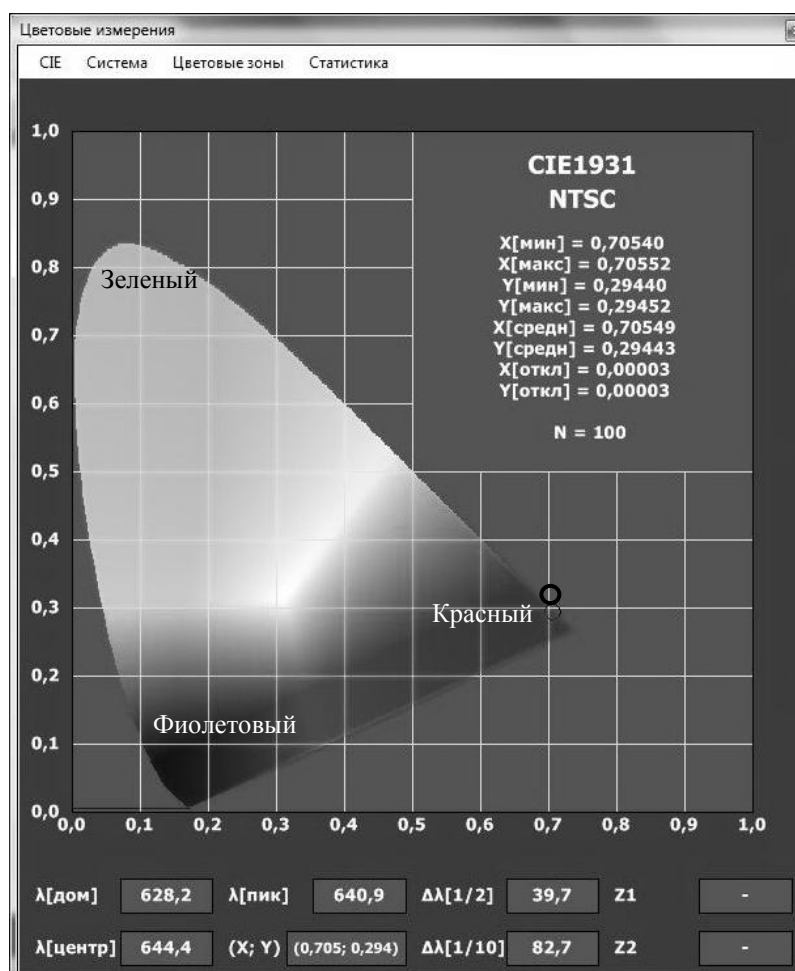


Рис. 3

В табл. 2 приведены максимальные, минимальные и средние значения цветовых координат x и y , а также среднеквадратичное отклонение определения координат (δ) для красного СИД по мере добавления цифровых фильтров.

Таблица 2

Добавляемый фильтр	$x_{\min}$	$x_{\max}$	x_{cp}	$y_{\min}$	y_{cp}	y	δ
Без дополнительной фильтрации	0.69846	0.69923	0.69882	0.29634	0.29704	0.29663	0.00026
Удаление геометрического шума	0.69849	0.69937	0.69894	0.29618	0.29696	0.29666	0.00025
Усреднение по 10 измерениям	0.69952	0.69994	0.69973	0.29665	0.29681	0.29673	0.00013
Отсечка порогового значения на уровне 0.5	0.70533	0.70558	0.70545	0.29434	0.29458	0.29446	0.00007
Сплайн-фильтрация с весом 1	0.70540	0.70552	0.70549	0.29440	0.29452	0.29443	0.00003

Подводя итоги проделанному эксперименту по воспроизводимости результатов колориметрических измерений СИД, можно сделать вывод, что оптический спектрометр в режиме спектрофотометра позволяет достичь требуемой воспроизводимости результата при измерениях цветовых параметров СИД. Очевидно, что методы цифровой фильтрации сигнала позволяют кардинально улучшить качество полученных спектров излучения. Устранение шумов исключает эффект разбеливания цвета при колориметрических измерениях, а также повышает воспроизводимость результатов этих измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуревич М. М. Цвет и его измерение. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1950. 269 с.
2. Барченко В. Т., Быстров Ю. А., Колгин Е. А. Ионно-плазменные технологии в электронном производстве. СПб.: Энергоатомиздат, 2001. 332 с.
3. Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики. М.: Мир, 2001. 604 с.
4. Никифоров С. Температура в жизни и работе светодиодов// Компоненты и технологии. 2006. № 1. С. 18–23.

R. V. Yudin, D. K. Kostrin, D. I. Shishov, A. A. Uhov

INCREASING ACCURACY AND REPRODUCIBILITY OF RESULTS OF COLORIMETRIC MEASUREMENTS OF LIGHT-EMITTING DIODES

Correction of a spectral characteristic of an optical spectrometer is considered. Influence of different methods of digital filtering of a signal on quality of a received spectrum of radiation is shown. Reproducibility of colorimetric measurements of light-emitting diodes is researched in case of application of digital filtering of a signal.

Light-emitting diode, spectrometer, signal filtering, colorimetric measurements

УДК 544.72.023.26

С. С. Туленин, Е. А. Федорова, Л. Н. Маскаева,
Ю. М. Спивак, В. А. Мошников, В. Ф. Марков

МИКРОСТРУКТУРА ГИДРОХИМИЧЕСКИ ОСАЖДЕННЫХ ПЛЕНОК Cu–Ga–Se

С использованием атомно-силовой и растровой электронной микроскопии исследована структура поверхности тонких пленок Cu–Ga–Se, полученных совместным гидрохимическим осаждением селенидов меди (I) Cu_2Se и галлия Ga_2Se_3 . Показано изменение архитектуры слоев и их морфологии после термической обработки в воздушной атмосфере при 723 K.

Селенид меди (I), селенид галлия (III), гидрохимическое осаждение, тонкие пленки, атомно-силовая микроскопия, растровая электронная микроскопия

Диселенид меди (I) и галлия наряду с диселенидом меди (I) и индия являются перспективными материалами солнечной энергетики благодаря комплексу уникальных свойств, к числу которых можно отнести оптимальную ширину запрещенной зоны (1.6 эВ), высокий коэффициент поглощения солнечного излучения, радиационную устойчивость.