



УДК 53.082.5

А. А. Ухов, Д. К. Кострин, В. А. Герасимов, Л. М. Селиванов, В. А. Симон
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Подавление интерференции в структуре фоточувствительных приборов с переносом заряда с помощью слоя люминофора

Рассмотрены особенности структуры фоточувствительных приборов с переносом заряда, приводящие к возникновению в ней интерференции и, как следствие, к ухудшению метрологических характеристик спектрометрического оборудования, построенного на основе таких фотоприемников. Расположение экстремумов осцилляции сигнала, вызванной интерференцией, определяется толщиной и показателем преломления пленки оксида на поверхности фотоприемника, а также регистрируемым спектральным диапазоном. Для того чтобы избавиться от волнообразной модуляции сигнала, требуется коррекция спектральной чувствительности. В данной статье проанализирована возможность подавления интерференции с помощью нанесения поверхностного слоя материала, обладающего сильным рассеянием. В качестве такого материала был выбран люминофор К-77, осажденный на поверхность секции накопления фотоприемника. Экспериментально подтверждено, что предлагаемая методика позволяет не только добиться практически полного подавления интерференции, но также увеличить чувствительность фотоприемника к излучению ультрафиолетового диапазона.

Фоточувствительный прибор с переносом заряда, оптический спектрометр, интерференция, люминофор, граница раздела сред, коэффициент пропускания, спектр излучения

Принцип работы фоточувствительных приборов с переносом заряда (ФППЗ) основан на свойствах структуры металл–оксид–полупроводник (МОП) накапливать неосновные носители зарядов в локализованных потенциальных ямах на границе полупроводника и оксида [1]. Потенциальные ямы заполняются зарядами в результате их генерации в полупроводнике под воздействием падающего на него оптического излучения.

В ФППЗ имеется специальная область, так называемая секция накопления, в которой и происходит генерация носителей зарядов под воздействием оптического излучения. В качестве фоточувствительных элементов обычно используются фотодиоды или в некоторых случаях МОП-элементы. В процессе генерации в отдельных элементах секции накопления возникает заряд, зависящий от площади элемента, интенсивности регистрируемого излучения и времени, в течение которого осуществляется накопление носителей зарядов [2].

Традиционная конструкция ФППЗ схематично приведена на рис. 1. На его поверхности лежит тонкий слой естественного оксида. Далее, в зависимости от типа фотоприемника, расположены поликремниевые электроды, а также диэлектрическая система оксид–нитрид кремния, находящаяся между электродами и подложкой.

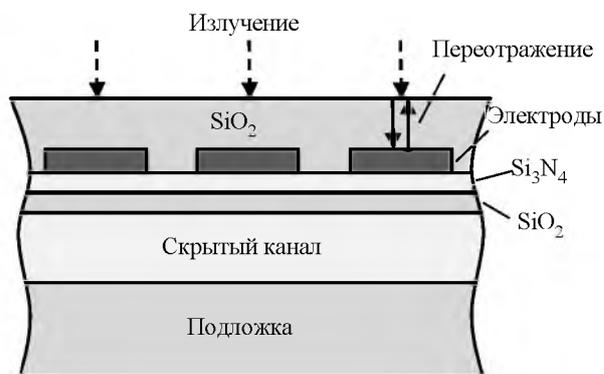


Рис. 1

В приведенной структуре каждый слой характеризуется толщиной и показателем преломления. Показатель преломления, в свою очередь, имеет действительную часть n и коэффициент экстинкции k (мнимая часть), который связан с коэффициентом поглощения α следующим соотношением [3]:

$$\alpha = 4\pi k / \lambda.$$

Предположим, что на поверхностный слой толщиной d падает световой луч E_0 (рис. 2). Будем рассматривать интерференцию от первичного луча E_0 и его двукратного отражения от границ пленки E_3 .

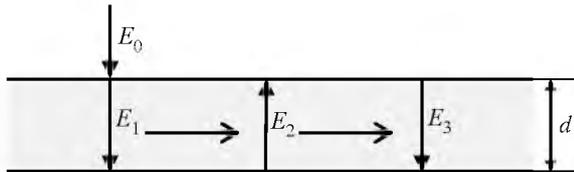


Рис. 2

Из теории интерференции известно, что при наличии двух источников излучения с равными амплитудами амплитуда в точке наблюдения равна

$$S = 2a^2 \cos \left[\frac{2\pi(L_1 - L_2)}{\lambda} + \frac{\varphi}{2} \right],$$

где a – амплитуда первичного луча E_0 ; L_1 – путь, пройденный первым лучом E_1 ; L_2 – путь, пройденный вторым лучом $E_1 + E_2 + E_3$; λ – длина волны; φ – начальная разность фаз.

Для случая когерентных волн начальная разность фаз постоянна, разность $L_1 - L_2$ также постоянна и, следовательно, различие интенсивности излучения зависит только от длины волны.

Разность фаз, возникающая от разности хода волн, определяется как

$$\Psi = 2\pi \left(\frac{L_1 - L_2}{\lambda} \right).$$

Разность хода можно выразить через длину волны $\Delta = L_1 - L_2 = m\lambda$, где m – любое целое или дробное число. Тогда разность фаз будет равна $\Psi = 2\pi m$. Интенсивность двух интерферирующих волн (без учета амплитуд и при условии равенства начальных фаз) можно записать в виде

$$I \sim A^2 = 2a^2 \cos \left[\frac{2\pi(L_1 - L_2)}{\lambda} \right] = a^2 \cos^2 (\pi m).$$

Целым значениям m соответствует различие по фазе на $2\pi m$, а интенсивность будет пропорциональна значению a^2 . При полуцелом m фазы складывающихся волн противоположны и интенсивность равна нулю (при равных амплитудах). В общем же случае при неравенстве амплитуд a_1 и a_2 имеем

$$I \sim A^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos^2 (2\pi m).$$

При целом m имеем максимумы $A^2 = (a_1 + a_2)^2$, а при полуцелом – минимумы $A^2 = (a_1 - a_2)^2$.

Зная параметры слоев фотоприемника, можно рассчитать коэффициент пропускания T , который определяется отношением мощности прошедшего в подложку излучения к мощности излучения, падающего на первую границу раздела. При фиксированной толщине слоя зависимость коэффициента пропускания от длины волны носит периодический характер для представленной системы воздух–оксид–поликремний–нитрид–оксид–кремний.

Поверхностная пленка оксида практически не влияет на форму сигнала в случае некогерентного излучения. Однако в оптической схеме спектрометра [4] каждый пиксель ФППЗ засвечивается монохроматическим излучением. В результате на границе раздела двух сред с различными показателями преломления неизбежно возникает интерференция. В каждом пикселе уровень интерференционного сигнала будет отличаться от соседних, поскольку длины волн падающего излучения в разработанных приборах непрерывно меняются по длине фотоприемника. Интерференция вызывает перераспределение амплитуды сигнала, что ведет к значительному искажению результатов измерений [5]. Например, при регистрации сигналов от источников излучения с непрерывным спектром излучения сигнал на выходе стандартного ФППЗ будет иметь глубокую модуляцию (рис. 3).

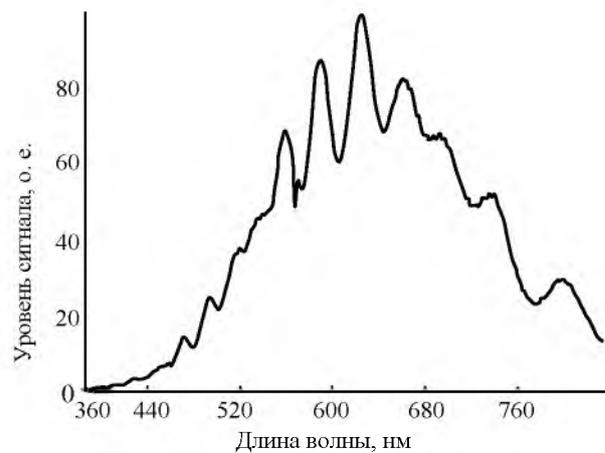


Рис. 3

Расположение экстремумов осцилляции сигнала определяется толщиной и показателем преломления пленки оксида на поверхности ФППЗ, а

также регистрируемым спектральным диапазоном [6]. Глубина модуляции сигнала будет зависеть от спектрального разрешения прибора, в котором этот фотоприемник установлен.

В спектрометре с ФППЗ типа TCD1304 глубина модуляции спектрального сигнала, представленного на рис. 3, составляет 38.35 % при амплитуде 99.04 % в выбранном локальном максимуме сигнала с максимальной глубиной модуляции. В результате нормированная глубина модуляции составляет 39 % на длине волны 603 нм. Данный фотоприемник имеет соотношение сигнал/шум 300, что дает амплитуду шума примерно 0.3 % от максимального сигнала. Амплитуду шума можно считать одинаковой и в максимуме, и в минимуме осцилляций интерференции. Таким образом, в минимуме осцилляций интерференции по отношению к соседнему максимуму соотношение сигнал/шум ухудшается на 39 % до 180. Наилучшим решением данной проблемы является применение ФППЗ с обратной засветкой. Поглощение в слое кремния препятствует интерференции на коротких длинах волн, однако в области ближнего инфракрасного излучения и здесь возможна интерференция, особенно для подложек, имеющих толщину нескольких микрон. Необходимо отметить, что стоимость линейных ФППЗ данного типа достаточно высока, что препятствует их использованию в недорогих массовых спектральных приборах. Для того чтобы избавиться от волнообразной модуляции сигнала наиболее распространенных ФППЗ, требуется коррекция их спектральной чувствительности [7]–[9].

Один из возможных способов подавления интерференции – нанесение на облучаемую поверхность ФППЗ тонкого слоя материала, обладающего сильным рассеянием. В результате на поверхность секции накопления будет попадать не когерентное излучение, а рассеянное, вследствие чего условие возникновения интерференции будет выполняться лишь для незначительной доли входного потока. При прохождении сквозь рассеивающую поверхность свет имеет две составляющие: диффузную и направленную, влияние которой необходимо снизить до минимума. В качестве такой поверхности будем рассматривать пленку, содержащую рассеивающие центры на поверхности, представляющие собой сферические частицы, размеры которых малы по сравнению с длиной волны (рис. 4).

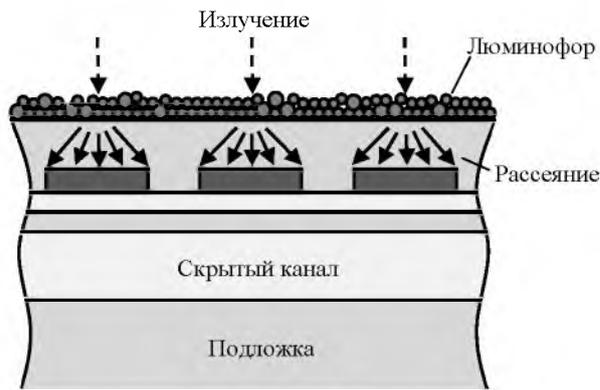


Рис. 4

В результате исследований было определено, что самым подходящим материалом для такой модификации фотоприемника является люминофор. Слой люминофора, нанесенный на поверхность секции накопления, может также увеличить ультрафиолетовую чувствительность ФППЗ, но при этом уменьшится общая чувствительность фотоприемника за счет поглощения части излучения в слое люминофора. Поэтому прозрачность люминофора во всем рабочем спектральном диапазоне должна быть достаточно высокой.

Люминофор при соответствующей технологии нанесения на ФППЗ представляет собой плоскопараллельный слой светорассеивающей среды. При этом можно считать, что на каждую элементарную площадку, равную площади одного пикселя, падает монохроматическое излучение. Поэтому для решения поставленной задачи рассмотрим плоский слой, который равномерно и диффузно облучен с одной стороны монохроматическим светом (рис. 5).

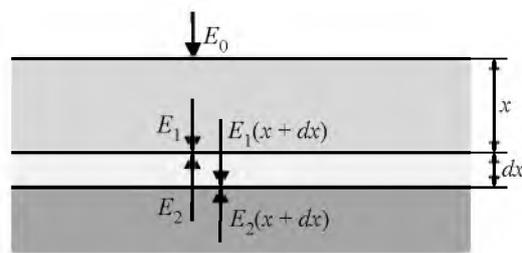


Рис. 5

Рассмотрим бесконечно тонкий слой толщиной dx на глубине x . Обозначим начальную освещенность через E_0 , через $E_1(x)$ и $E_2(x)$ – освещенность сверху и снизу для плоскости, расположенной на глубине x . Рассмотрим световой баланс в бесконечно тонком слое. Можно записать следующие соотношения [10]:

$$E_1(x + dx) = t(dx)E_1(x) + r(dx)E_2(x + dx); \quad (1)$$

$$E_2(x) = t(dx)E_2(x+dx) + r(dx)E_1(x), \quad (2)$$

где t и r – коэффициенты пропускания и отражения соответственно.

Решив (1), (2), можно получить следующие выражения:

$$E_1(x) = E_0 \frac{\sinh(L(x_0 - x) - \ln(\rho(\infty)))}{\sinh(Lx_0 - \ln(\rho(\infty)))}; \quad (3)$$

$$E_2(x) = E_0 \frac{\sinh(L(x_0 - x))}{\sinh(Lx_0 - \ln(\rho(\infty)))},$$

где $L = \sqrt{k^2 + 2ks}$; $\rho(\infty) = 1 + \frac{k}{s} - \sqrt{\left(\frac{k}{s}\right)^2 + \frac{2k}{s}}$.

В представленных выражениях $\rho(\infty)$ – это коэффициент отражения слоя бесконечной толщины; k – показатель поглощения излучения (зависит от длины волны и не зависит от размера частиц); s – показатель рассеяния излучения (зависит как от длины волны, так и от размера частиц).

Из (1) и (3) можно получить выражения для коэффициентов пропускания τ и отражения ρ слоя толщиной x_0 :

$$\tau = \frac{E_1(x_0)}{E_0} = \frac{\sinh(-\ln(\rho(\infty)))}{\sinh(Lx_0 - \ln(\rho(\infty)))}; \quad (4)$$

$$\rho = \frac{E_1(0)}{E_0} = \frac{\sinh(Lx_0)}{\sinh(Lx_0 - \ln(\rho(\infty)))}. \quad (5)$$

Учитывая, что коэффициент поглощения равен $\alpha = 1 - (\tau + \rho)$, используя (4) и (5), можно записать:

$$\alpha = 1 - \frac{\sinh(Lx_0) + \sinh(-\ln(\rho(\infty)))}{\sinh(Lx_0 - \ln(\rho(\infty)))}.$$

Рассмотрим случай, когда люминесценция возникает в тонком приповерхностном слое со стороны возбуждающего излучения и распространяется как в прямом, так и в обратном направлении. При таких допущениях поток излучения люминесценции можно записать в виде

$$E_{ex}(x_0) = \frac{1}{2} E_{em} \tau_{em}, \quad (6)$$

где

$$E_{em} = \gamma(\lambda) E_0 \alpha_{ex}. \quad (7)$$

Выражение (7) определяет общий поток излучения люминесценции с единичной площади, в нем $\gamma(\lambda)$ – энергетический коэффициент преобра-

зования возбуждающего излучения, равный произведению квантового отношения $R(\lambda)$ на квантовый выход $\eta(\lambda)$:

$$\gamma(\lambda) = R(\lambda)\eta(\lambda).$$

Квантовое отношение определяется как отношение средней энергии фотона люминесценции W_λ к энергии падающего фотона с длиной волны λ_0 :

$$R(\lambda) = \frac{W_\lambda}{W_{\lambda_0}}.$$

Подставив (7) в (6), получим выражение для плотности люминесценции:

$$E_{ex}(x_0) = \frac{1}{2} \gamma(\lambda) E_0 \alpha_{ex} \tau_{em}.$$

В выражениях обозначения ex и em относятся к возбуждающему и люминесцентному излучению. Очевидно, что при увеличении толщины слоя люминофора значение $E_{ex}(x_0)$ возрастает за счет увеличения α_{ex} , а с другой стороны, снижается за счет уменьшения τ_{em} . В результате значение $E_{ex}(x_0)$ имеет максимум, положение которого зависит от значений α_{ex} и τ_{em} .

Учитывая, что часть возбуждающего излучения не поглощается в слое люминофора, а проходит сквозь него, можно записать общее выражение для прошедшего и люминесцентного излучения в виде

$$E_{ex}(x_0) = \frac{1}{2} \gamma(\lambda) E_0 \alpha_{ex} \tau_{em} + E_0 \tau_{ex}. \quad (8)$$

Рассмотрим систему ФППЗ–слой люминофора. Для анализа эффективности слоя люминофора необходимо учитывать абсолютный квантовый выход самого фотоприемника. С учетом этого выражение (8) для количества фотоэлектронов n_p можно записать в виде

$$n_p = \left[\frac{1}{2} \gamma(\lambda) E_0(\lambda) \alpha_{ex}(k, s, x_0) \tau_{em}(k, s, x_0) + E_0(\lambda) \tau_{ex}(k, s, x_0) \right] Q(\lambda), \quad (9)$$

где $Q(\lambda)$ – абсолютная квантовая эффективность фотоприемника.

Для упрощения (9) примем, что излучение люминесценции люминофора происходит только на одной длине волны, которая равна λ_0 :

$$n_p = \frac{1}{2} \gamma(\lambda) E_0(\lambda) \alpha_{ex}(k, s, x_0) \tau_{em}(k, s, x_0) Q(\lambda) + E_0(\lambda) \tau_{ex}(k, s, x_0) Q(\lambda). \quad (10)$$

Анализируя (10), можно заметить, что первое слагаемое указывает на долю того излучения, которое поглощается в люминофоре и преобразуется им в видимое излучение, а второе слагаемое указывает на долю прямо прошедшего возбуждающего излучения.

Рассмотрим ситуацию, когда часть возбуждающего излучения поглощается, а часть проходит сквозь люминофор. Для тех длин волн, где выполняется условие

$$\frac{1}{2} \gamma(\lambda) \alpha_{ex}(k, s, x_0) \tau_{em}(k, s, x_0) Q(\lambda) < \tau_{ex}(k, s, x_0) Q(\lambda),$$

коэффициент пропускания возбуждающего излучения должен быть близок к единице, откуда следует, что слой люминофора должен быть как можно тоньше.

Характеристики слоя люминофора очень сильно зависят от распределения частиц по размерам. Размер зерен люминофора влияет на качество его закрепления на поверхности ФППЗ. Причем прочность закрепления люминофора растет при уменьшении размеров зерна, однако при этом одновременно снижается эффективность возбуждения люминофора в результате повышения коэффициента отражения возбуждающего излучения. Размеры частиц влияют на показатель рассеяния s . Рассмотрим люминофор как набор частиц диаметром d при числе частиц в единице объема z . Тогда площадь поперечного сечения всех частиц S в единице объема имеет вид

$$S = \frac{\pi d^2}{4} z. \quad (11)$$

При плотной упаковке z обратно пропорционально объему частицы:

$$z \sim \frac{1}{V} = \frac{6}{\pi d^3}. \quad (12)$$

Показатель рассеяния s прямо пропорционален площади поперечного сечения частиц в единице объема, тогда его с учетом (11) и (12) можно записать как

$$s \sim S \sim \frac{1}{d}. \quad (13)$$

Из (13) следует, что при увеличении в люминофоре количества мелких частиц увеличивается s , что, в свою очередь, приводит к увеличению коэффициента отражения слоя ρ , и в результате к уменьшению эффективности преобразования излучения в люминесценцию.

На основании изложенного можно сформулировать основные требования к фотолюминофорам для ФППЗ:

- высокая эффективность возбуждения (высокий квантовый выход);
- высокий коэффициент пропускания видимого излучения;
- линия излучения люминофора должна совпадать с максимумом квантовой эффективности ФППЗ;
- высокая стабильность в процессе эксплуатации прибора;
- время послесвечения люминофора должно быть согласовано с тактовой частотой ФППЗ.

В связи с тем что наибольший интерес с точки зрения повышения чувствительности прибора вызывает ультрафиолетовая область, необходимо особое внимание уделять при выборе фотолюминофора эффективности его возбуждения на длинах волн от 200 до 400 нм. При этом желательно, чтобы длина волны излучения фотолюминофора соответствовала максимальной квантовой эффективности поглощения излучения в ФППЗ. В настоящее время разработаны достаточно эффективные люминофоры. Так, например, фирма «Phosphor Technology» предлагает люминофоры, которые имеют длину волны возбуждения 254 или 365 нм. При этом линия излучения находится в красной области, что соответствует максимальной квантовой эффективности поглощения излучения большинства спектральных приборов, построенных с применением ФППЗ. Нанесение люминофора также применяется в спектрометрах отечественного производства, но исключительно для повышения чувствительности в ультрафиолетовой области спектра.

Наиболее распространенным способом нанесения люминофорного покрытия является осаждение из водных растворов суспензий [11]. Перед началом технологического процесса порошок люминофора просеивается: остаются частицы с диаметром меньше 12 мкм. Затем изготавливается суспензия люминофора в дистиллированной воде, иногда с добавлением силиката калия. Далее с помощью ультразвукового воздействия полученная суспензия перемешивается. В зависимости от того, в какой момент времени поставить под осаждающийся поток подложку, будут осажены частицы определенной фракции. Для контроля толщины наносимого слоя параллельно идет процесс осаждения на контрольный образец, который взвешивается до и после операции. Далее осуществляется сушка полученного покрытия.

Таким способом были осаждены образцы люминофоров на поверхность ФППЗ. Эксперимент дал положительный результат, а технология осаждения из водных растворов суспензий люминофоров никак не ухудшила свойства фотоприемника.

Для возможности улучшения параметров ФППЗ были исследованы два люминофора: люминофор К-77 с удельными навесками 0,77, 0,82, 1,12 и 2,06 мг/см² и ФК-6 с удельными навесками 1,21 и 2,27 мг/см². Люминофор К-77 является катодлюминофором, его состав Y₂O₃:Eu. Максимальный диаметр отобранной фракции люминофора составил 4 мкм. Спектр люминесценции люминофора К-77 имеет красный цвет свечения. Люминофор возбуждается излучением в интервале 210...280 нм. Максимальная яркость свечения люминофора наблюдалась при возбуждении длиной волны, равной 250 нм. Люминофор ФК-6 является фосфоросодержащим фотолюминофором. Максимальный диаметр отобранной фракции не превышает 4 мкм. Люминофор имеет красно-оранжевый цвет свечения. Возбуждающее излучение лежит в широком интервале длин волн от ультрафиолета до видимого: 250...512 нм. Максимальная яркость свечения наблюдалась при возбуждении длиной волны, равной 400 нм. Интенсивность люминесценции люминофора с удельной навеской 2,27 мг/см² была выше, чем более тонкого люминофора с удельной навеской 1,21 мг/см².

Спектр люминесценции люминофора К-77 имеет ярко выраженный максимум, совпадающий с максимумом спектральной чувствительности ФППЗ. Спектр люминесценции люминофора ФК-6 ярко выраженного максимума не имеет. Его излучение лежит в довольно широком интервале длин волн от 550 до 750 нм.

Коэффициент пропускания люминофора К-77 лежит в интервале 5–10 % и практически не зависит от удельной навески люминофора. Максимальным пропусканием обладает люминофор с удельной навеской 0,82 мг/см². Коэффициент пропускания люминофора ФК-6 колеблется в ин-

тервале 8–50 %, в зависимости от удельной навески люминофора и от длины волны. Выше пропускание у фотолюминофора с удельной навеской 1,21 мг/см².

Люминофор К-77 с удельной навеской 1,12 мг/см² был осажден на поверхность секции накопления ФППЗ типа TCD1304AP производства фирмы «Toshiba». Нанесение люминофора не повлияло на разрешающую способность спектрометра. Разрешение спектрометра в обоих случаях (с люминофором и без него) составило 3 нм. Нанесение люминофора полностью устранило волнистую огибающую спектральной характеристики спектрометра (рис. 6).

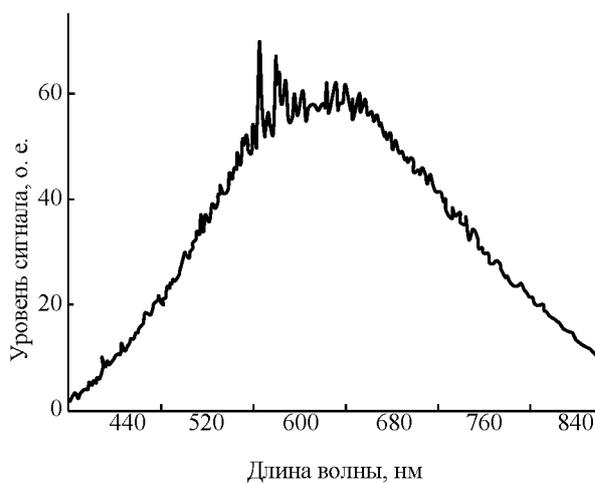


Рис. 6

Сравнив спектры лампы накаливания, полученные с помощью спектрометра с ФППЗ без люминофорного покрытия и с ним, можно утверждать, что волнообразную модуляцию удалось подавить полностью. Шумы, возникающие при регистрации спектра лампы накаливания, объясняются наличием инородных частиц в использованном люминофоре. Эти отклонения носят стационарный во времени характер и в дальнейшем могут быть устранены путем совершенствования технологии осаждения люминофора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кострин Д. К., Лисенков А. А., Ухов А. А. Электронные средства контроля технологических процессов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 228 с.
2. Кострин Д. К., Ухов А. А. Светосигнальная характеристика ПЗС-фотоприемника в области больших световых потоков // Контроль. Диагностика. 2013. № 5. С. 40–42.

3. Крылова Т. Н. Интерференционные покрытия. Оптические свойства и методы исследования. Л.: Машиностроение, 1973. 224 с.
4. Кострин Д. К., Ухов А. А. Аппаратно-программный спектрометрический комплекс для исследования параметров светоизлучающих диодов // Биотехносфера. 2013. № 3. С. 21–25.

5. Кострин Д. К., Ухов А. А. Интерференция в поверхностном слое и метрологические параметры спектрометров с ПЗС-фотоприемниками // Датчики и системы. 2013. № 5. С. 13–15.

6. Пихтин А. Н., Колгин Е. А., Ухов А. А. Подавление интерференционных искажений спектральной чувствительности в спектрометрах с ПЗС-фотоприемниками // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2003. № 2. С. 7–10.

7. Ухов А. А. Применение многоэлементных фотоприемников в оптических спектрометрах. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 157 с.

8. Кострин Д. К., Ухов А. А. Повышение метрологических характеристик спектрометрического оборудования при диагностике ионно-плазменных про-

цессов // Вакуумная техника и технология. 2014. Т. 24, № 1. С. 34–38.

9. Modification of the Photosensitive CCD Structures for Application in the Spectrometric Equipment / V. A. Simon, D. K. Kostrin, A. A. Uhov et al. // Proc. of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Eng. Conf. 2017. P. 342–345.

10. Демин А. П. Метод уменьшения погрешности оптико-электронных спектральных приборов с многоэлементной фотоэлектрической регистрацией спектра: автореф. дис. ... канд. техн. наук / ОАО «НПО ГИПО». Казань, 2011. 22 с.

11. Гугель Б. М. Люминофоры для электровакуумной промышленности. М.: Энергия, 1967. 343 с.

A. A. Uhov, D. K. Kostrin, V. A. Gerasimov, L. M. Selivanov, V. A. Simon
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

SUPPRESSION OF INTERFERENCE IN THE STRUCTURE OF PHOTSENSITIVE DEVICES WITH CHARGE TRANSFER USING A PHOSPHOR LAYER

The paper discusses features of the structure of photosensitive devices with charge transfer, resulting in occurrence of interference and, as a consequence, to the degradation of the metrological characteristics of spectrometric equipment based on these photodetectors. Location of the extrema of the signal oscillation caused by interference is determined by thickness and refractive index of the oxide film on the photodetector surface, and also by the detected spectral range. In order to get rid of the wavy signal modulation correction of the spectral sensitivity is required, in this paper is analyzed the possibility of interference suppression by applying the surface layer of material with strong light scattering. As this material was chosen phosphor K-77 deposited on the surface of the accumulation section of the photodetector. Experimentally confirmed is that the proposed method allows not only to achieve almost complete suppression of interference, but also to increase the sensitivity of the detector to radiation in the ultraviolet range.

Photosensitive device with charge transfer, optical spectrometer, interference, phosphor, media boundary, transmittance, emission spectrum