шума (90–5 дБ), УФ-излучение (1–5 относительных единиц).

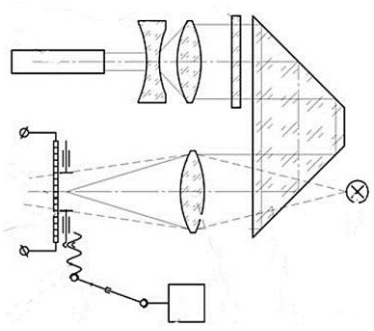

Рисунок 1 – Адаптичный алгоритм управления автоматической юстировкой лазерного дальномера

Конструктивная реализация алгоритма предусматривает наличие двигателля благодаря которому будет приводится в движение винтовой механизи, который используя шаррир Гука [8].

Таким образом, современная юстировка лазеров основывается на синтезе классических оптических принципов с передовыми технологиями автоматизации, интеллектуального контроля и адаптивных систем, что открывает новые горизонты для применения лазеров в науке, промышленности, медицине и других высокотехнологичных сферах. Повышение точности и эффективности юстировки способствует развитию инновационных технологий и расширению функциональных возможностей лазерных систем, что делает их незаменимыми инструментами в современном технологическом мире.

Литература

1. Автоматизированная юстировка лазеров с использованием адаптивной оптики / Дж. Смит [и др.] // Optics Express. – 2021. – Т. 29, № 15. – С. 24050–24062.

2. Чен, Л. Методы юстировки волоконных лазеров: проблемы и решения / Л. Чен, Ю. Чжао, Х. Ван // Journal of Laser Applications. – 2020. – Т. 32, № 4. – Ст. 042008.

3. Пьезоэлектрические микропозиционеры для точной юстировки лазеров / Ф. Лю [и др.] // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2021. – Т. 70. – С. 1–8.

4. Кумар, Р. Мониторинг параметров луча в реальном времени в лазерных системах / Р. Кумар, С. Гупта, Т. Ли // Sensors. – 2022. – Т. 22, № 7. – Ст. 2759.

5. Гарсия, М. Методы машинного обучения для оптимизации юстировки лазерных систем / М. Гарсия, К. Джонсон // Applied Optics. – 2023. – Т. 62, № 9. – С. 2345–2354.

6. Соколов, А. С. Автоматизированная юстировка лазерных систем с использованием сенсоров обратной связи / А. С. Соколов, С. А. Никитов // Квантовая электроника. – 2022. – Т. 52, № 3. – С. 245–258.

7. Басов, Н. Г. Квантовая электроника / Н. Г. Басов. – М.: Наука, 1986. – 528 с.

8. Белойван, П. А. Автоматизированная юстировка параллельности энергетической оси передающего канала и оси приемного канала лазерного дальномера / П. А. Белойван [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2–2. – С. 136.

УДК 535.6.08 (004.932)

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦВЕТА В КОЛОРИМЕТРИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Савкова Е. Н.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Предложен комплексный подход к описанию результатов определения цвета в количественных и качественных методах колориметрии цифровых изображений, основанный на теории множеств и теории графов, позволяющий снижать частные и глобальные риски ошибок первого и второго рода.
Ключевые слова: цвет, цифровое изображение, координата цветности, множество, граф.

A COMPREHENSIVE APPROACH TO DESCRIBING THE RESULTS OF COLOR DETERMINATION IN DIGITAL IMAGE COLORIMETRY

Savkova Y. N.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. A comprehensive approach to describing the results of color determination in quantitative and qualitative methods of digital image colorimetry based on set theory and graph theory is proposed. This approach allows for reducing the private and global risks of first- and second-order errors.
Keywords: color, digital image, chromaticity coordinate, set, graph.

Адрес для переписки: Савкова Е. Н., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: savkova@bntu.by

В цифровой колориметрии количественные методы исследований переходят в качественные и наоборот, поскольку для отображения цвета используют функциональные цветовые пространства. Поэтому для описания результатов определения цвета может быть применим комплексный подход. В *количественных методах* результат измерения представляет собой интервал или область охвата значений величины согласно ISO/IEC GUIDE 98-4:2012(E). В *качественных методах* осуществляется трансформирование шкал порядка, интервалов,

отношений и абсолютных в категорийные (номинационные), а результат определения цвета представляет собой некоторое качественное свойство, «которое не может быть выражено размером» [1]. При этом «порядковые результаты можно свести к бинарным (да/нет) результатам и обработать путем трактовки результатов порядковой классификации как «правильных» или «неправильных» [2]. В общем случае результат определения цвета описывают оценки: «наилучшая»; рассеяния; вероятностная.

В *количественных методах* наилучшая оценка выходной величины может быть выражена интенсивностью сигнала в цветовом канале или координатами цвета (цветности) через единственное выборочное значение, математическое ожидание, моду, медиану, рассчитанные по области пикселей на внутриэкземплярном или межэкземплярном уровнях, а также значением, полученным из косвенного измерения.

Оценки рассеяния выражаются неопределенностью, дисперсией, доверительными границами, областью охвата в цветовом пространстве или на графике цветностей. Для моделей с произвольным числом входных и выходных величин результат измерения сводится к совокупности вектор-столбцов и ковариационных матриц, состоящих из ковариационных пар, возрастающих в 2^n раз пропорционально числу входных величин. Определитель ковариационной матрицы является обобщенной дисперсией случайного вектора, который характеризует меру рассеивания случайного *n*-мерного вектора.

Вероятностная оценка может быть представлена доверительной вероятностью, вероятностью охвата или уровнем доверия в зависимости от способа получения измерительной информации, достоверности, целевого стандартного отклонения, полноты знаний об объекте и других факторов. В цифровой колориметрии вероятностные оценки могут варьироваться в широком диапазоне с использованием различных видов распределений вероятностей (помимо Гаусса или Стьюдента).

В *качественных методах* наилучшая оценка определения цвета выражается символом, набором символов, совокупностями или последовательностями признаков. В детекторных методах оценка величины (с учетом рекомендаций ГОСТ Р ИСО 11843-4-2005) может быть представлена «точкой перегиба» на уровнях селективности, пределов обнаружения LOD или количественного определения LOQ, значением в рабочей части диапазона интенсивности цвета и в области, близкой к насыщению диапазона применения метода для одного или более цветовых каналов. Неопределенности обнаружения проявляются в отклонении градуировочных зависимостей $N_R(L)$, $N_G(L)$, $N_B(L)$ от равномерного распределения. Доверительные границы $\varepsilon(N_c)$, характеризующие возможности метода с точки зрения обнаружения в отношении интенсивности цвета N_c цветового канала *C*, могут рассчитываться согласно ГОСТ Р ИСО 11843-3-2005 по формуле:

$$\varepsilon(N_c) = \bar{N}_{cb} \pm k_{1-\alpha}\sigma_0\sqrt{\frac{1}{J}+\frac{1}{K}}, \qquad (1)$$

где $\bar{N}_{cb}$ – арифметическое среднее повторений определения базового состояния; σ_0 – среднее квадратическое отклонение; $k_{1-\alpha}$ – коэффициент (квантиль Лапласа $z_{1-\alpha}$ или коэффициент Стьюдента $t_{1-\alpha}$); s_0 – оценка среднего квадратического отклонения; J – количество повторений измерений каждого стандартного образца, представляющего нулевое значение приведенной переменной состояния (холостая проба) при применении метода; K – количество повторений измерений в действительном состоянии (исследуемая проба) при применении метода.

Согласно ГОСТ Р ИСО 11843-4-2005 нижняя доверительная граница *CL* метода определения цвета, соответствующая уровню доверия 100(1–α) %:

$$CL = \frac{\bar{y}_g - \eta_b}{\sqrt{s_g^2 + s_b^2}} - \frac{t_{1-\gamma}(\nu)}{\sqrt{N}}, \qquad (2)$$

где $\bar{y}_g$ – выборочное среднее откликов базового состояния; η_b – значение математического ожидания для откликов базового состояния в реальных условиях эксплуатации; s_g – оценка стандартного отклонения откликов образца, приведенная переменная состояния которого равна X_g; s_b – оценка стандартного отклонения откликов базового состояния; N – количество повторений измерений каждого стандартного образца при оценке способности обнаружения.

В классификационных и идентификационных методах в качестве оценок рассеяния используются показатели «шанс», «неопределенность долей», «тождественность», «однозначность», «последовательность», «отношение правдоподобия» [2], которые определяются при валидации, например, через чувствительность или робастность. В классификационных методах понятие неопределенности также соотносится с идентичностью признаков на межгрупповом или внутригрупповом уровнях, а уровень приемлемости устанавливается для конкретной задачи.

Обобщением количественных и качественных методов цифровой колориметрии является описательный аппарат теории множеств. Так, для совокупности точек с координатами цвета $q(R_i, G_i, B_i)$ в цветовом пространстве RGB, через взвешенный центр которой проходит цветовой тензор G_{RGB}, создавая в продольном сечении цветового пространства векторное поле A_{RGB}, можно записать:

$$A_{RGB} = \{q(R_i, G_i, B_i) | G_{RGB}\}. \qquad (3)$$

Для совокупности точек с координатами цвета $q(X_i; Y_i; Z_i)$ в цветовом пространстве XYZ, через взвешенный центр которой проходит цветовой тензор $\mathbf{G}_{XYZ}$, создавая в продольном сечении цветового пространства векторное поле A_{XYZ}, справедливо выражение:

$$A_{XYZ} = \{q(X_i; Y_i; Z_i)|\mathrm{G}_{XYZ}\}. \quad (4)$$

Проекция векторного поля A_{XYZ} на график цветности (сечение m) создает скалярное поле $\mathring{\mathrm{A}}_m$, которое характеризуется множество точек Ω с координатами цветности $q_k(x_m; y_m)$:

$$\mathring{\mathrm{A}}_m = \Omega(x_m; y_m) = \{q_k(x_m; y_m)|A_{XYZ}\}. \quad (5)$$

Множество Ω представляет собой область охвата результата определения цвета на плоскости графика цветности:

$$\Omega = \int_{\bar{x}-U_x}^{\bar{x}+U_x} \int_{\bar{y}-U_y}^{\bar{y}+U_y} q(x,y)dxdy. \quad (6)$$

где U_x, U_y – расширенные неопределенности величины по координате x и y соответственно.

В дискретном виде:

$$\Omega = \{q(x_m; y_m)|\mathring{\mathrm{A}}_m\}. \quad (7)$$

Таким образом, скалярное поле $\mathring{\mathrm{A}}_m$ характеризуется некоторым конечным множеством точек Ω на плоскости графика цветности. Наилучшей оценкой величины является центр тяжести $q(\bar{x}, \bar{y})$ совокупности точек множества Ω.

Литература

1. Международный словарь по метрологии: основные и общие понятия и соответствующие термины / пер. с англ. и фр. – 2-е изд., испр. – СПб.: НПО «Профессионал», 2010. – 82 с.

2. Руководство Еврахим/СИТАК «Оценка эффективности и неопределенности в качественном химическом анализе». – 1-е изд. – 2021. – 64 с.

УДК 681.382

ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ *P-I-N*-ФОТОДИОДОВ С ГЕТТЕРАМИ, СОЗДАННЫМИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИЕЙ СУРЬМЫ

Оджаев В. Б.[1], Петлицкий А. Н.[2], Просолович В. С.[1], Шестовский Д. В.[2], Явид В. Ю.[1], Янковский Ю. Н.[1], Исмайлов Б. К.[3], Кенжаев З. Т.[3], Черный В. В.[4]

[1]Белорусский государственный университет
[2]ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Минск, Беларусь
[3]Ташкентский государственный технический университет им. И.Каримова
Ташкент, Узбекистан
[4]Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Аннотация. Исследованы вольтамперные характеристики *p-i-n*-фотодиодов, содержащих геттеры, сформированные имплантацией ионов сурьмы, на обратной стороне кремниевой пластины. Параллельно исследовались контрольные образцы, прошедшие все этапы технологического процесса изготовления приборов за исключением имплантации примесей в непланарную сторону пластины. Показано, что после формирования геттера электрофизические параметры приборов существенно зависят как от вида внедренных ионов, так и режимов последующих преципитирующего и диффузионного отжигов. Наличие на вольтамперных характеристиках *p-i-n*-фотодиодов, содержащих геттерирующие центры, созданные имплантацией ионов сурьмы, ступенчатых участков свидетельствует о термической генерации носителей заряда с глубоких энергетических уровней неоднородно распределенных структурных дефектов и технологических примесей в области пространственного заряда *p-i-n*-фотодиодов.
Ключевые слова: *p-i-n*-фотодиод; геттерирующие примеси; ионная имплантация; термообработка.

VOLTAGE-CURRENT CHARACTERISTICS OF p-i-n PHOTODIODES WITH GETTERS CREATED BY ION IMPLANTATION OF ANTIMONY

Odzhaev V. B.[1], Pyatlitski A. N.[2], Prosolovich V. S.[1], Shestovsky D. V.[2], Yavid V. Yu.[1], Yankovski Yu. N.[1], Ismaylov B. K.[3], Kenzhaev Z. T.[3], Chornyi V. V.[4]

[1]Belarusian State University, Minsk, Belarus
[2]"INTEGRAL" Joint Stock Company, Minsk, Belarus
[3]Tashkent State Technical University named after I. Karimov, Tashkent, Uzbekistan
[4]Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. Volt-ampere characteristics of p-i-n photodiodes containing getters phosted by implantation of antimony ions on the back of a silicon wafer were investigated. In parallel, control samples were studied that went through all stages of the instrument manufacturing process, with the exception of implantation of impurities in the non-planar side of the plate. It has been shown that after the formation of the getter, the electrophysical parameters of the devices significantly depend on both the type of embedded ions and the modes of subsequent precipitation and diffusion annealing. Presence of stepped sections on current-voltage characteristics of p-i-n photodiodes, which contain gettering centres created by implantation of antimony ions, testifies to thermal generation of charge carriers from deep energy levels of in homogeneously distributed structural defects and technological impurities in the space charge region of p-i-n photodiodes.
Keywords: p-i-n photodiode; getter impurities; ion implantation; heat treatment.