

УДК 535.643.8

DOI: 10.18384/2310-7251-2020-3-13-22

## ГАММА-КОРРЕКЦИЯ ПОЛНОЦВЕТНЫХ АКТИВНО-МАТРИЧНЫХ МИКРОДИСПЛЕЕВ НА ОСНОВЕ ОРГАНИЧЕСКИХ СВЕТОДИОДОВ

**Нуриев А. В., Стахарный С. А., Усов Н. Н.**

Центральный научно-исследовательский институт «Циклон»  
107497, г. Москва, Щелковское ш., д. 77, Российская Федерация

### Аннотация.

**Цель** работы – исследование особенностей гамма-коррекции полноцветных активно-матричных микродисплеев на основе органических светодиодов в широком динамическом диапазоне яркости.

**Процедура и методы.** Исследования проведены расчётно-экспериментальным методом с помощью математического моделирования цветовых координат электролюминесценции органических светодиодов при различных яркостях и с учётом спектров пропускания RGB-светофильтров. Моделирование проводилось на основе данных, полученных при измерении электрических, светотехнических и спектральных характеристик образцов органических светодиодов и спектров пропускания RGB-светофильтров.

**Результаты.** Представлена базовая конструкция активно-матричных микродисплеев на основе органических светодиодов и метод получения полноцветного изображения с применением матрицы цветных светофильтров. Приведены электрические, светотехнические и спектральные характеристики исходных структур белого цвета свечения, проведено моделирование цветоделения в системе RGB и рассмотрены факторы, влияющие на цветопередачу полноцветного изображения. Выявлены особенности гамма-коррекции полноцветного изображения микродисплеев в зависимости от уровня яркости свечения матрицы органических светодиодов и температуры окружающей среды.

**Практическая значимость** исследований важна при разработке полноцветных микродисплеев на основе органических светодиодов и их калибровки при производстве.

**Ключевые слова:** микродисплей, ОСИД, органический светодиод, полноцветное изображение, системы цветов

## GAMMA CORRECTION OF FULL COLOR OLED MICRODISPLAYS

**A. Nuriev, S. Stakharny, N. Usov**

Central Research Institute "Cyclone"  
77 Shelkovskoe shosse, Moscow 107497, Russian Federation

### Abstract.

**Aim** is to study the features of gamma correction of full-color active-matrix OLED microdisplays in a wide dynamic range of brightness.

**Methodology.** The study was carried out by calculation and experimental methods by modeling color coordinates of OLED electroluminescence at different luminance and accounts RGB color

filters transmission spectra. The modeling based on experimental data obtained by measuring the electrical, photometric and spectral characteristics of OLED samples and the transmission spectra of RGB color filters.

**Results.** Introduced base construction of full color active-matrix OLED microdisplays and method of forming color image by filter matrix. Electrical, photometrical and spectral characteristics of initial white OLED structures was represented as well as modeling of RGB color separation and factors affecting color balance of full color image. The features of full color OLED microdisplay gamma correction for different luminance level and temperatures are considered.

**Research implications.** Researches have practical relevance for OLED microdisplays design and calibration in production stage.

**Keywords:** microdisplay, OLED, Organic light emitting diode, full color image, color systems

### Введение

В настоящее время активно развивается направление средств отображения информации индивидуального типа – микродисплеи на основе органических светодиодов (OLED – Organic light emitting diode). Современные OLED-микродисплеи при диагонали экрана порядка 20 мм имеют разрешение до 2Кх2К полноцветного изображения, что даёт перспективу широкого применения в устройствах (очках) виртуальной, дополненной и смешанной реальности (VR, AR и MR), а также различных видеомодулей для специальных применений.

OLED-структуры представляют собой тонкоплёночные электролюминесцентные (ЭЛ) устройства на основе нанотонких слоёв органических материалов, нанесённых на различные типы подложек [1]. Для производства OLED-микродисплеев применяются подложки из монокристаллического кремния с активно-матричными схемами управления (АМСУ), изготовленными по стандартным групповым процессам кремниевой технологии. АМСУ осуществляет запись и хранение значения яркости свечения всех пикселей экрана в течение кадра, при этом каждый пиксель полноцветного экрана состоит из 3 RGB-субпикселей, баланс яркости которых отвечает за качество цветопередачи во всём динамическом диапазоне. Гамма-коррекция определяет зависимость яркости свечения экрана от уровня кодирования яркости, а в случае полноцветного изображения имеет три компоненты на каждый цветовой канал (RGB). Из-за физических особенностей OLED-структур [2; 3], форма спектра ЭЛ может изменяться в зависимости от яркости свечения [4] и рабочей температуры, что приводит к цветовым искажениям и смещению баланса белого. Исследование спектров ЭЛ исходных OLED-структур, моделирование цветodelения и кривых гамма-коррекции позволит получить высококачественное полноцветное изображение OLED-микродисплеев во всём динамическом диапазоне и при различных рабочих температурах.

### Полноцветные OLED микродисплеи и их свойства

Хорошо отработанным способом получения полноцветных OLED-микродисплеев является нанесение матрицы светофильтров поверх матри-

цы субпикселей, излучающих белый свет [1]. Схематически пиксель OLED-микродисплея, состоящий из трёх RGB-субпикселей, показан на рис. 1.

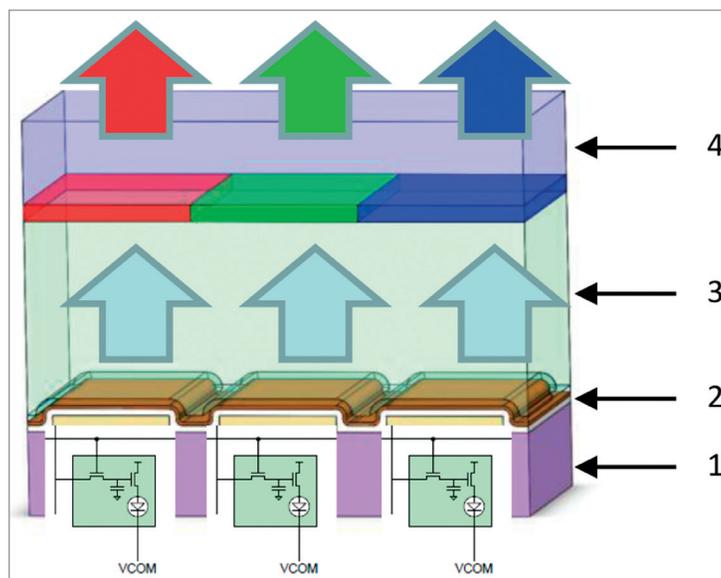


Рис. 1. / Fig. 1. Формирование RGB-субпикселей с помощью матрицы светофильтров. / Formation of RGB subpixels using a matrix of light filters.

Источник: данные авторов / Source: authors' data.

На кремниевой подложке с АМСУ (1) сформирована матрица субпиксельных анодов, на которую наносится многослойная OLED-структура белого цвета свечения (2) с полупрозрачным верхним катодом. Для формирования полноцветного изображения поверх OLED-структуры, при помощи УФ-отверждаемого полимера (3), наносится матрица светофильтров на покровном стекле (4), изготовленная методом фотолитографии с помощью цветных фоторезистов. Такой метод наиболее широко распространён при производстве полноцветных OLED-микродисплеев. Более перспективным является метод формирования матрицы светофильтров непосредственно поверх OLED-структуры, также методом фотолитографии [5], но требующий надёжный герметизирующий слой тонкоплёночной защиты OLED-структуры. Оба метода позволяют произвести цветоделение исходного белого света свечения субпикселей в RGB-каналы полноцветного изображения с помощью светофильтров. На рис. 2 (а, б, в) показаны характеристики образцов площадью  $0,69 \text{ см}^2$  со стандартной OLED-структурой белого цвета свечения, применяемой в АО «ЦНИИ «Циклон» при производстве микродисплеев. Результирующие спектры ЭЛ данной трёхкомпонентной OLED-структуры белого цвета свечения имеют непрерывное заполнение практически на весь диапазон видимого спектра [6]. Для получения необходимого спектра ЭЛ необходим подбор высокочистых эмиссионных органических материалов, их анализ [7; 8; 9] и баланс в RGB-структуре.

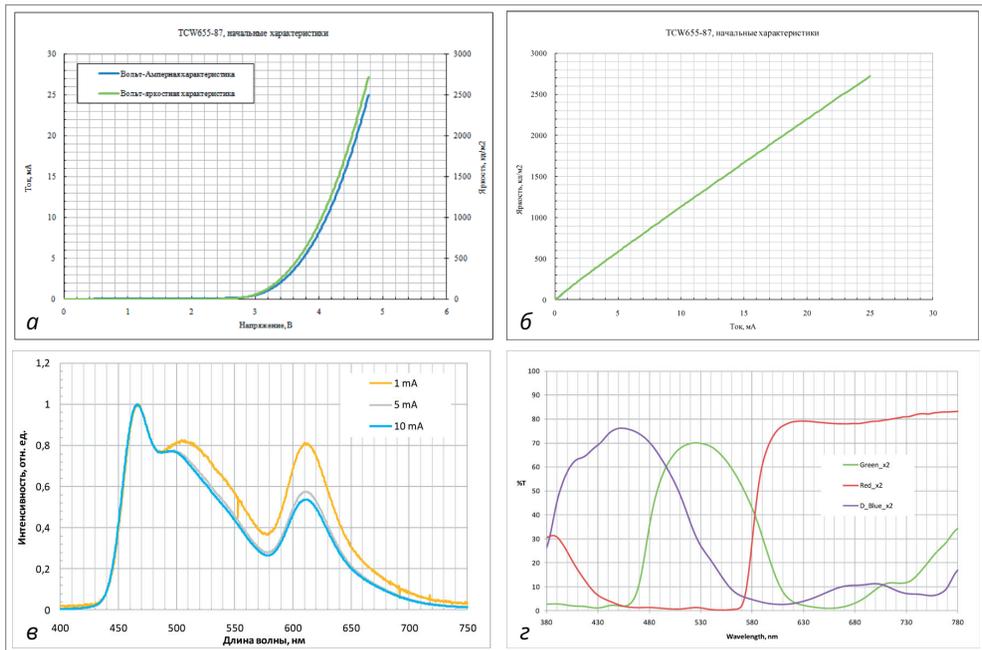


Рис. 2. / Fig. 2. *a* – вольт-амперные и вольт-яркостные характеристики; *б* – зависимость яркости от тока; *в* – спектр ЭЛ спектр OLED-структуры белого цвета свечения при токах 1, 5 и 10 мА; *г* – спектры пропускания RGB светофильтров. / *a* – Current-voltage and current-brightness characteristics; *b* – dependence of brightness on current; *c* – EL spectrum of OLED structure of white luminescence at currents of 1, 5 and 10 mA; *d* – transmission spectra of RGB light filters.

Источник: данные авторов / Source: authors' data.

На рис. 2б показаны спектры пропускания образцов цветных RGB-фоторезистов, изготовленных на стеклянных подложках, спектр пропускания которых аппаратно вычитался при измерениях. Цвет излучения RGB-субпикселей после цветоделения можно смоделировать интегральным произведением функции спектральной плотности мощности исходной белой OLED-структуры  $S_{OLED}(\lambda)$  на функцию спектрального пропускания соответствующего светофильтра  $S_{CF}(\lambda)$ :

$$S(\lambda) = \int_{380}^{780} S_{OLED}(\lambda) \times S_{CF}(\lambda) d\lambda. \quad (1)$$

Цветовые координаты излучения субпикселя  $x_u$  МКО рассчитываются из результирующей функции спектральной плотности мощности  $S(\lambda)$  по методу 179:2007 МКО [10]. На рис. 3 показаны цветовые координаты, рассчитанные из смоделированных спектров излучения RGB-каналов, образующих треугольник цветового охвата OLED-микродисплея. Баланс RGB-каналов определяет цветовые координаты полноцветного изображения, в том числе и градаций белого во всём динамическом диапазоне.

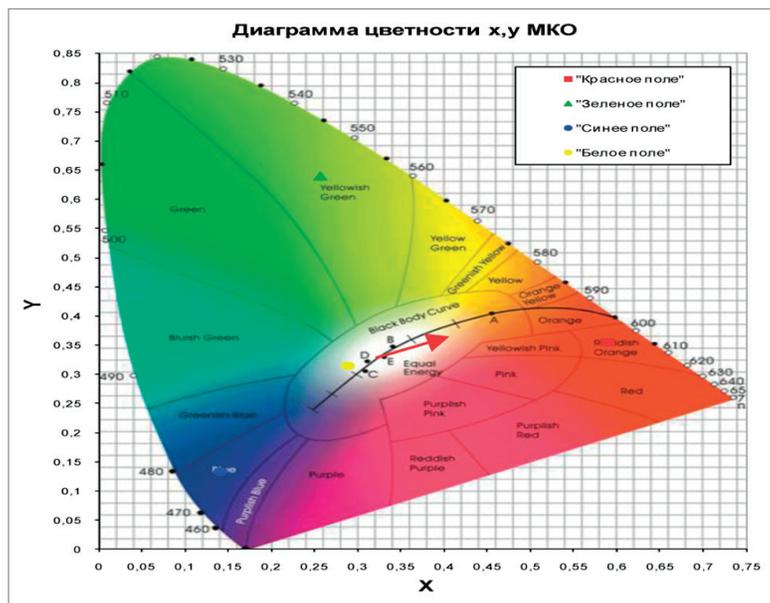


Рис. 3. / Fig. 3. Цветовые координаты RGB-каналов и белого поля. / Color coordinates of RGB channels and white field.

Источник: данные авторов / Source: authors' data.

Как видно из нормированных спектров ЭЛ (рис. 2в) при различных токах через OLED-структуру, баланс компонент исходного спектра изменяется. В области низких токов возрастает спектральная плотность мощности в зелёной и, особенно, красной области спектра относительно синего. Данный эффект обусловлен физическими свойствами структур органических полупроводников, в которых эффективность образования более высокоэнергетических экситонов возрастает с ростом напряжения и сообщения большей энергии носителям заряда, инжектированным в структуру из электродов. Таким образом, при одинаковом RGB-балансе во всём динамическом диапазоне, шкала градаций белого будет иметь существенные цветовые искажения и смещение в красный цвет при низких яркостях.

При изменении рабочей температуры вольт-амперная характеристика (ВАХ) и спектр ЭЛ OLED-структуры также существенно изменяются.

С ростом температуры снижаются рабочие напряжения (рис. 4а) и для одинаковой величины тока, протекающей через структуру, возрастает спектральная плотность мощности в зелёной и красной области спектра относительно синего (рис. 4б).

Это объясняется снижением эффективности образования более высокоэнергетических экситонов при понижении рабочего напряжения с ростом температуры. Таким образом, при заданном RGB-балансе при пониженных температурах изображение на экране будет иметь смещение в синий цвет, а при повышенных – в красный.

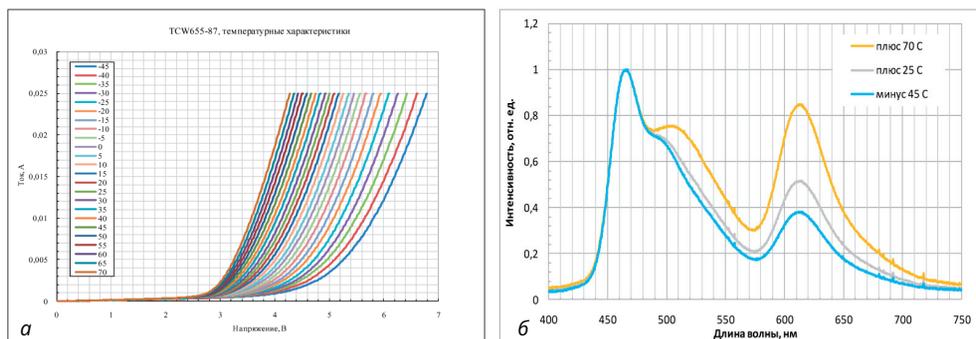


Рис. 4. / Fig. 4. Характеристики OLED-структуры белого цвета свечения при различных температурах: а – Вольт-Амперные характеристики; б – ЭЛ спектры для тока 10 мА. / Characteristics of OLED-structure of white glow at different temperatures: а – current-voltage characteristics; б – EL spectra for a current of 10 mA.

Источник: данные авторов / Source: authors' data.

### Гамма-коррекция полноцветных OLED-микродисплеев

Ток, протекающий через каждый субпиксель в течение кадра, определяет яркость свечения и контролируется независимыми драйверными ячейками АМСУ. Ячейки представляют собой повторители напряжения ёмкости ячейки, которое подаётся на анод субпикселя за вычетом передаточной характеристики ячейки. Так как ВАХ и, соответственно, вольт-яркостная характеристика (ВЯХ) OLED-структуры имеет сильно нелинейный характер и пороговое напряжение, до которого свечение отсутствует, входной цифровой видеосигнал необходимо преобразовывать в управляющее напряжение с поправкой на кривую гамма-коррекции. Фактически гамма-коррекция – это обратная функция ВЯХ, которая компенсирует нелинейность характеристики и пороговое напряжение OLED-структуры. Коррекция может достигаться путём табличного преобразования во внешнем микроконтроллере из 8-битного входного сигнала в 10-битный, подаваемый на вход микродисплея. На рис. 5 представлена системная гамма-коррекция ( $\Gamma=1$ ), линеаризующая яркость свечения монохромного белого МД Ldisplay (GL) в зависимости от уровня кодирования яркости входного сигнала GrayLevel (GL).

Смоделированная кривая гамма-коррекции определена как 8 поправочных коэффициентов, соответствующих нормализованных яркостей как функции  $2^i$ , где показатель  $i$  целое число, изменяющееся от 1 до 8. Для сравнения на графике приведены нормированные зависимости яркости от уровня кодирования без гамма-коррекции  $L(GL)$  OLED, определяемые характеристиками OLED-структуры, и с линеаризующей зависимостью системной гамма-коррекции  $L(GL)$  Display. В потребительской электронике чаще используются гамма-коррекции со степенной зависимостью яркости от уровня кодирования, например со степенью 1,6 или 2,2, для получения лучшего контраста в ярких градациях.

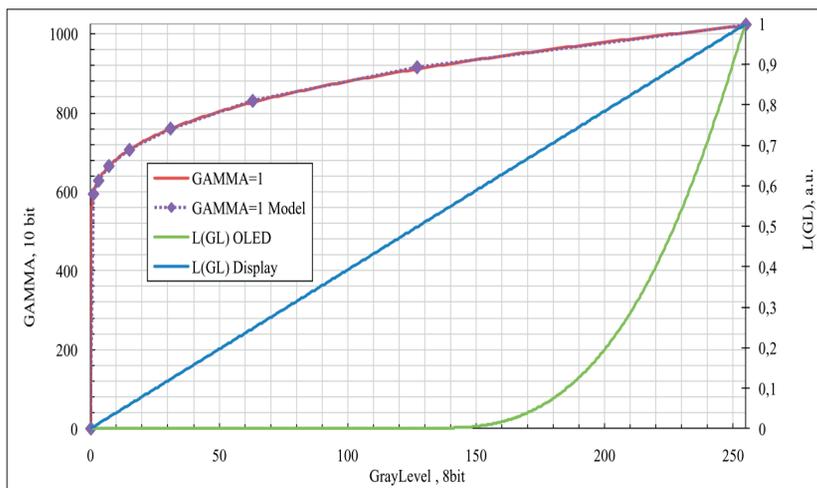


Рис. 5. / Fig. 5. Системная гамма-коррекция монохромного белого МД. / Systemic gamma correction of monochrome white MD.

Источник: данные авторов / Source: authors' data.

Как было показано выше, форма спектра ЭЛ исходной OLED-структуры белого цвета свечения изменяется в зависимости от величины тока, протекающего через структуру. Данный эффект приведёт к цветовым искажениям полноцветного изображения МД в зависимости от яркости в случае одинаковой гамма-коррекции для всех цветовых каналов RGB.

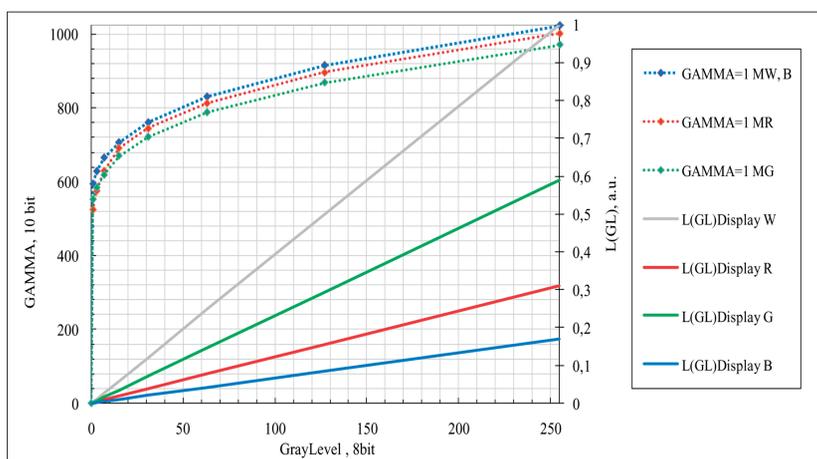


Рис. 6. / Fig. 6. Системная гамма-коррекция полноцветного МД. / Systemic gamma correction of full color MD.

Источник: данные авторов / Source: authors' data.

На рис. 6 показаны смоделированные независимые системные гамма-коррекции GAMMA=1 MR/G/B, позволяющие получить линейные зависимости ярко-

сти RGB каналов от уровня кодирования и соотношением, обеспечивающим одинаковые цветовые координаты белого (баланс белого) во всём динамическом диапазоне яркости МД. В данном случае кривая гамма-коррекции канала В, имеющего наименьшую световую эффективность, принята за базовую, а R и G скорректированы для обеспечения баланса белого. Для коррекции цветовых искажений, возникающих за счёт температурных изменений формы спектра ЭЛ исходных OLED-структур, требуется выявление этих закономерностей и их учёт при независимой гамма-коррекции RGB-каналов.

### Заключение

Для получения высококачественного изображения на полноцветных OLED-микродисплеях необходима независимая гамма-коррекция цветовых RGB-каналов, что обусловлено физическими принципами работы OLED-структур. Данные принципы коррекции широко применяются, описаны и предоставляются производителями OLED-микродисплеев [11, р. 26–28, 35–38] для выпускаемых ими изделий. Как правило, производители предоставляют базовые системные гамма-коррекции яркости белого поля и без учёта температурных зависимостей. Точные значения кривых гамма-коррекции могут быть получены только путём проведения исследований и моделирования с учётом свойств конкретной OLED-структуры, цветных фильтров и свойств субпиксельных ячеек активно-матричной схемы управления, используемых в конструкции конкретного микродисплея.

*Статья поступила в редакцию 10.09.2020 г.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Микродисплеи на основе органических светодиодов МД01 / Усов Н. Н., Грачёв О. А., Кондрацкий Б. А., Котовский О. А., Новичков А. А., Нуриев А. В., Чередниченко А. Г. // Современная электроника. 2016. № 1. С. 34–37.
2. Kalinowski J. Electroluminescence in organics // Journal of Physics D: Applied Physics. 1999. Vol. 32. Iss. 24. P. R179–R250. DOI: 10.1088/0022-3727/32/24/201.
3. Kalinowski J. Optical Characteristics of Organic LEDs // Organic Light-Emitting Diodes: Principles, Characteristics & Processes. New York: Taylor&-Francis Group, 2005. P. 275–343.
4. Усов Н. Н., Стахарный С. А. Органические светодиоды // Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю. Б. Айзенберга. М.: Светотехника, 2019. С. 47–60.
5. Baldo M. A., Thompson M. E., Forrest S. R. High-efficiency fluorescent organic light-emitting devices using a phosphorescent sensitizer // Nature. 2000. Vol. 403. P. 750–753.
6. An 852x600 pixel OLED-on-silicon color microdisplay chip using CMOS subthreshold-voltage-scaling current driver / Haiqing Lin, Naviasky E., Ebner J., Evans W., Farrell P., Hufford M., Levy G., Wheeler D., Allison B., Prache O. // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2002. Vol. 37. No. 12. P. 1879–1889. DOI: 10.1109/ISSCC.2002.992293.
7. Строение и свойства материалов для формирования эмиссионных слоев красного цвета свечения ОСИД-структур / Чередниченко А. Г., Панина Ю. С., Стахарный С. А., Усов Н. Н. // Успехи в химии и химической технологии. 2017. Том 31. № 15 (196). С. 28–31.

8. Чередниченко А. Г., Усов Н. Н. Идентификационный анализ органических электролюминесцентных соединений // *Успехи в химии и химической технологии*. 2017. Т. 31. № 1. С. 112–114.
9. Стахарный С. А. Органические светодиоды – инновационный источник света // *Светотехника*. 2018. Специальный выпуск «Свет в музее». С. 71–75.
10. CIE 179:2007. Methods for Characterising Tristimulus Colorimeters for Measuring the Colour of Light [Электронный ресурс]. URL: <http://cie.co.at/publications/methods-characterising-tristimulus-colorimeters-measuring-colour-light> (дата обращения: 20.03.2020).
11. eMagin Corporation. 1280x1024 Low power color XL AMOLED microdisplay. Datasheet for p/n EMA-101400-01, 2016 [Электронный ресурс]. URL: <https://emagin.com/products/sxga120/2-product-sheets/249-data-sheet-sxga120> (дата обращения: 20.03.2020).

## REFERENCES

1. Usov N. N., Grachev O. A., Kondratskii B. A., Kotovskii O. A., Novichkov A. A., Nuriev A. V., Cherednichenko A. G. [Microdisplays based on organic LEDs MD01]. In: *Sovremennaya elektronika* [Modern electronics], 2016, no. 1, pp. 34–37.
2. Kalinowski J. Electroluminescence in organics. In: *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1999, vol. 32, iss. 24, pp. R179–R250. DOI: 10.1088/0022-3727/32/24/201.
3. Kalinowski J. Optical Characteristics of Organic LEDs. In: *Organic Light-Emitting Diodes: Principles, Characteristics & Processes*. New York, Taylor&Francis Group Publ., 2005, pp. 275–343.
4. Usov N. N., Stakharnyi S. A. [Organic LEDs]. In: *Spravochnaya kniga po svetotekhnike* [Lighting Engineering Reference Book]. Moscow, Svetotekhnika Publ., 2019, pp. 47–60.
5. Baldo M. A., Thompson M. E., Forrest S. R. High-efficiency fluorescent organic light-emitting devices using a phosphorescent sensitizer. In: *Nature*, 2000, vol. 403, pp. 750–753.
6. Haiqing Lin, Naviasky E., Ebner J., Evans W., Farrell P., Hufford M., Levy G., Wheeler D., Allison B., Prache O. An 852x600 pixel OLED-on-silicon color microdisplay chip using CMOS subthreshold-voltage-scaling current driver. In: *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2002, vol. 37, no. 12, pp. 1879–1889. DOI: 10.1109/ISSCC.2002.992293.
7. Cherednichenko A. G., Panina Yu. S., Stakharnyi S. A., Usov N. N. [Structure and properties of materials for forming the emission layers of the red color luminescence OLED structures]. In: *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii* [Advances in chemistry and chemical technology], 2017, vol. 31, no. 15 (196), pp. 28–31.
8. Cherednichenko A. G., Usov N. N. [Identification analysis of organic electroluminescent materials]. In: *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii* [Advances in chemistry and chemical technology], 2017, vol. 31, no. 1, pp. 112–114.
9. Stakharnyi S. A. [Organic LEDs – an innovative light source]. In: *Svetotekhnika* [Lighting engineering], 2018, Special issue “Light in the Museum”, pp. 71–75.
10. CIE 179:2007. Methods for Characterising Tristimulus Colorimeters for Measuring the Colour of Light. Available at: <http://cie.co.at/publications/methods-characterising-tristimulus-colorimeters-measuring-colour-light> (accessed: 20.03.2020).
11. eMagin Corporation. 1280x1024 Low power color XL AMOLED microdisplay. Datasheet for p/n EMA-101400-01, 2016. Available at: <https://emagin.com/products/sxga120/2-product-sheets/249-data-sheet-sxga120> (accessed: 20.03.2020).

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Нуриев Александр Вадимович* – кандидат технических наук, заместитель начальника отделения 600 Центрального научно-исследовательского института «Циклон»;  
e-mail: nurievav@gmail.com;

*Стахарный Сергей Алексеевич* – начальник отделения 600 Центрального научно-исследовательского института «Циклон»;  
e-mail: stakharnys@yandex.ru;

*Усов Николай Николаевич* – доктор технических наук, главный конструктор Центрального научно-исследовательского института «Циклон»;  
e-mail: usov-nn@yandex.ru.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Alexandr V. Nuriev* – Cand. Sci. (Engineering), Deputy Head of Division 600, Central Research Institute “Cyclone”;  
e-mail: nurievav@gmail.com;

*Sergey A. Stakharny* – Head of Division 600, Central Research Institute “Cyclone”;  
e-mail: stakharnys@yandex.ru;

*Nikolay N. Usov* – Dr. Sci. (Engineering), Chief Designer, Central Research Institute “Cyclone”;  
e-mail: usov-nn@yandex.ru.

---

### ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Нуриев А. В., Стахарный С. А., Усов Н. Н. Гамма-коррекция полноцветных активно-матричных микродисплеев на основе органических светодиодов // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2020. № 3. С. 13–22.

DOI: 10.18384/2310-7251-2020-3-13-22

### FOR CITATION

Nuriev A. V., Stakharny S. A., Usov N. N. Gamma correction of full color OLED microdisplays. In: *Bulletin of the Moscow state regional University. Series: Physics-Mathematics*, 2020, no. 3, pp. 13–22.

DOI: 10.18384/2310-7251-2020-3-13-22