

## Анализ картин полевого эмиссионного проектора и вопросы корректного определения локальных токовых характеристик многоострийного катода

© А.Г. Колосько<sup>1</sup>, Е.О. Попов<sup>1</sup>, С.В. Филиппов<sup>1</sup>, Б.Э. Мутыгуллин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: agkolosko@mail.ru

Поступило в Редакцию 3 мая 2024 г.

В окончательной редакции 27 сентября 2024 г.

Принято к публикации 30 октября 2024 г.

Разработана методика анализа структуры световых откликов на картинах свечения полевого проектора. Предложен алгоритм выделения областей, соответствующих отдельным эмиссионным центрам. Подтверждена теория возникновения эффекта гало, связанная с упругим отскоком электронов от поверхности люминофора.

**Ключевые слова:** полевая эмиссия, полевой эмиссионный проектор, эффект гало.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.24.59433.6598k

Для анализа свойств многоострийных полевых катодов часто применяется полевой эмиссионный проектор с плоским люминесцентным экраном [1]. В иностранной литературе эту систему иногда называют IMLS (integral measurement system with the luminescent screen). Она состоит из плоского люминесцентного анода, расположенного на близком расстоянии от полевого катода, где вакуумный зазор, как правило, составляет несколько сотен микрометров. Потoki электронов от отдельных эмиссионных центров формируют на экране так называемые картины свечения, которые регистрируются с помощью цифровых камер. Эти картины позволяют наблюдать изменение эмиссионной активности отдельных центров, распределять между ними токовую нагрузку и даже рассчитывать локальные эмиссионные характеристики, пригодные для теоретического анализа. Оценка с помощью IMLS равномерности распределения токовой нагрузки и изучение особенностей отдельных эмиттеров в составе массива других острий позволяют проводить направленную технологическую оптимизацию многоострийных полевых катодов.

Размытие изображения эмиттеров на картине свечения не позволяет однозначно определить области, соответствующие этим эмиттерам, с тем, чтобы, например, проследить за особенностями работы каждого эмиттера в ходе полевой эмиссии. Выделение областей, соответствующих отдельным эмиттерам, можно осуществить путем задания порогового уровня яркости [2], причем размеры таких областей с ростом уровня приложенного напряжения будут непременно увеличиваться, так как при этом вся картина свечения становится ярче [3]. Также по относительному размеру таких областей можно оценивать долю стабильных во времени эмиттеров, долю появившихся и долю выключившихся эмиттеров [4]. В частности, для задания такой области можно использовать эффект передержки — естественное ограничение

уровня яркости в матрице цифровой камеры, с помощью которой регистрируются картины свечения. Тогда на оцифрованном профиле картины свечения будут наблюдаться горизонтальные плато. Площадь этих плато можно принять за площадь эмиссии [5]. Однако взаимосвязь площади описанных выше областей с формальной площадью эмиссии, которая задается теоретиками как отношение полного тока эмиттера к плотности тока на его вершине, является неоднозначной, так же как и взаимосвязь профиля яркости выделенных областей с локальными токовыми характеристиками отдельных эмиттеров. Дело в том, что на структуру световых откликов влияет множество паразитных эффектов [6].

Самым естественным из таких эффектов является разлет электронов в разные стороны по пути от катода к аноду. В работе [7] было проведено моделирование потока электронов с вершины углеродной нанотрубки на поверхность люминесцентного анода. Показано, что профиль яркости пятна имеет вид округлого пика, близкого по форме к параболе.

Другим эффектом, который часто наблюдается на картинах свечения совершенно различных типов полевых катодов, является возникновение светящегося гало вокруг центрального пятна. Иногда круги ореолов перестают быть сплошными и приобретают форму кольца. В работе [8] наблюдаемый эффект гало был объяснен отскоком части электронов от места их попадания на анод (абсолютно упругое отражение от заряженной электродами поверхности люминофора и возвращение на анод в стороне от первого места прилета). Расчеты показали, что расстояние отскока электрона  $Z$  подчиняется уравнению

$$Z = 2d_{sep} \frac{\varepsilon_S}{eU}, \quad (1)$$

где  $d_{sep}$  — межэлектродное расстояние,  $\varepsilon_S$  — энергия электрона, отскочившего от поверхности,  $U$  — напря-

жение между катодом и анодом. Отсюда максимальное расстояние отскока, достигаемое при  $\varepsilon_S = eU$ , составляет  $Z_{\max} = 2d_{sep}$ .

В той же работе [8] экспериментально была показана зависимость радиуса ореола от межэлектродного расстояния: с ростом расстояния радиус линейно увеличивался. При этом от силы тока (плотности потока электронов) размер ореола не зависел.

Ранее нами была разработана методика анализа картин свечения для нахождения положения отдельных эмиттеров и сбора информации об их эмиссионных свойствах в условиях мерцания картины свечения (обработка видео в режиме real-time) [9].

Целью настоящей работы является анализ структуры световых откликов на картине свечения, а также разработка методики устранения влияния перекрытия откликов на оценку локальных свойств эмиттеров.

Измерительная установка представляла собой вакуумный пост с плоскопараллельным расположением электродов в измерительной камере, оснащенный источником высокого напряжения (высоковольтный трансформатор) и многоканальной компьютеризированной системой сбора, записи и анализа (в режиме real-time, а также в режиме эмуляции сигнала) данных о полевой эмиссии. Программа регистрации, записи и обработки сигналов написана на языке графического программирования LabVIEW. Детальное описание можно найти в работе [9]. Уровень вакуума был не хуже  $10^{-7}$  Torr. Межэлектродное расстояние (от подложки катода до анода) составляло  $d_{A-C} = 570 \mu\text{m}$ . Уровень эмиссионного тока был  $45 \mu\text{A}$ . Картины свечения имели разрешение  $1280 \times 960$ , на один пиксель приходилось  $20 \mu\text{m}$ . Для анализа структуры световых откликов на картине свечения была написана специальная программа, в основе которой лежат три операции: перевод картины свечения в серые тона (уровень яркости одного пикселя  $L_1$  от 0 до 255 — так называемые градации серого), сглаживание фурье-фильтром и поиск пиков яркости.

Тестовый образец представлял собой матрицу из 20 кремниевых эмиттеров, имеющих форму восьмигранных пирамид высотой  $H \sim 200 \mu\text{m}$  и шириной в основании  $W \sim 170 \mu\text{m}$ , расположенных друг от друга на расстоянии  $D \sim 1000 \mu\text{m}$ . Образец изготовлен в Национальном исследовательском университете „МИЭТ“ методами ультрафиолетовой литографии и является частью программы по разработке рентгеновских аппаратов [10].

Наблюдаемые на картинах свечения острых эмиттеров световые отсветы можно разделить на три группы: 1) светящаяся точка; 2) светящаяся точка с круглым ореолом почти постоянного уровня яркости; 3) светящаяся точка с ореолом неправильной формы.

Проанализируем структуру световых откликов. Алгоритм анализа картины свечения включает в себя следующие пункты: 1) получение координат максимумов яркости (положение центров эмиссии на картине свечения); 2) определение расстояния до ближайшего соседа для каждого центра ( $R_{site-to-site}$ ); 3) разбиение

картины свечения вокруг каждого центра на концентрические круги (приращение радиуса круга  $\Delta R = 1 \text{ px}$ , предел —  $R_{site-to-site}$ ); 4) расчет суммарной яркости всех пикселей в этих кругах  $L_C = \sum_{circle} L_1$ ; 5) расчет суммарной яркости пикселей в соответствующих кольцах  $L_R = \sum_{ring} L_1$ ; 6) расчет средней яркости пикселей в кольце  $L_{RA} = L_R/A$ , где  $A$  — площадь кольца радиуса  $R$ , измеренная в пикселях (отметим, что  $A \sim R$  из-за того, что ширина кольца равна  $1 \text{ px}$ ); 7) проведение аналогичных расчетов для разных уровней тока  $I$ .

На рис. 1, *a* представлены полученные зависимости от радиуса  $R$  величин  $L_C$  и  $L_R$  для светового отклика с круглым ореолом (график ограничен радиусом  $50 \text{ px}$ , где яркость падает до нуля).

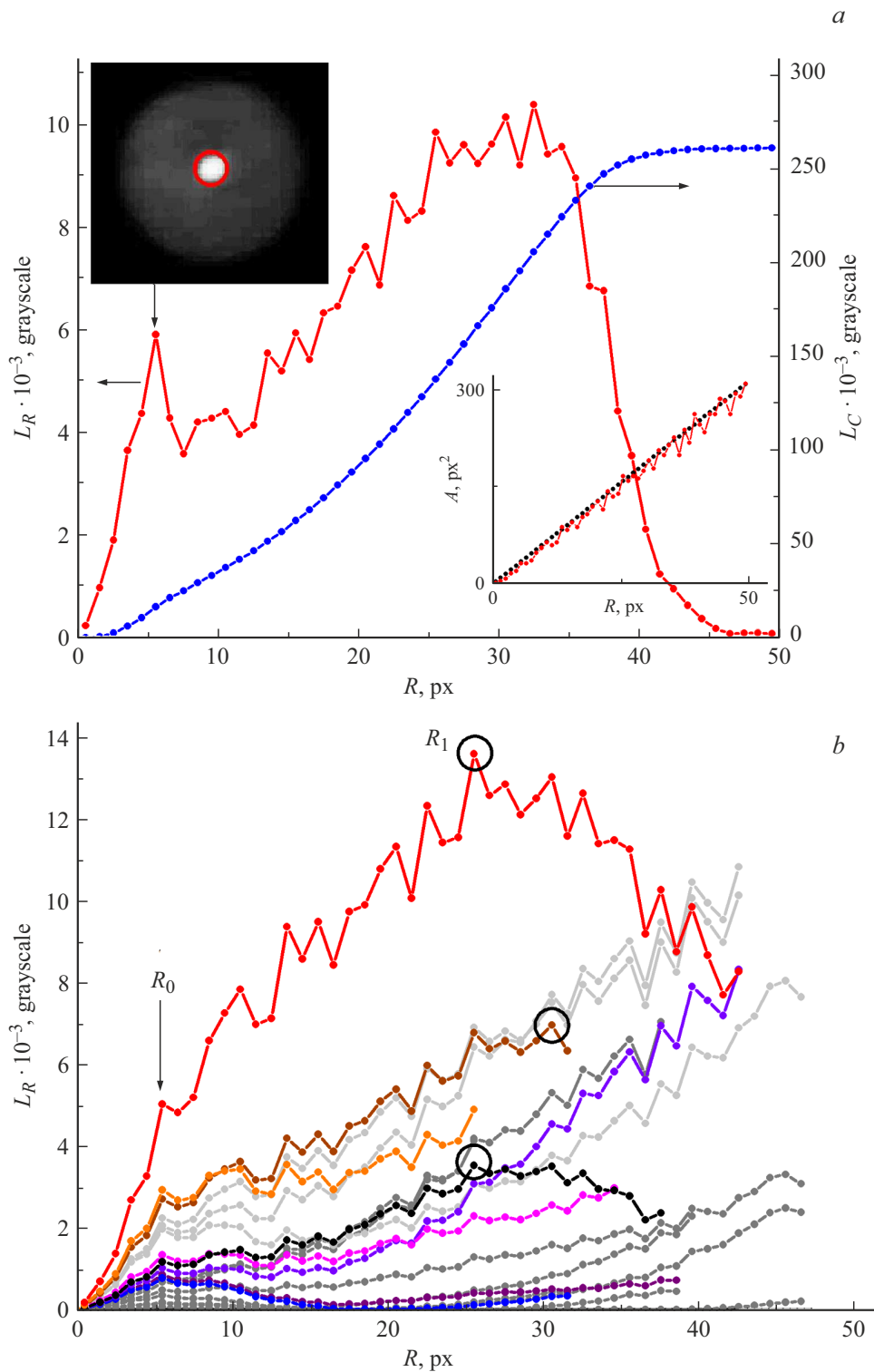
Зависимость  $L_R(R)$  имеет характерный пик в начале диапазона (на рис. 1, *a* этот пик указан стрелкой), который означает начало падения яркости светового отклика.

Окружность с радиусом  $R_0$ , который соответствует началу падения суммарной яркости в кольце, можно считать проекцией эмиссионной поверхности отдельного эмиттера на картине свечения, а ее площадь можно называть „площадью светового отклика эмитирующей поверхности“. Следующий значимый пик на этой зависимости соответствует началу падения яркости ореола ( $R_1$  от 25 до 35 px).

На рис. 1, *b* показаны зависимости  $L_R(R)$  для 19 эмиссионных центров в составе многоострийного катода. Радиус области эмиссии у всех оказался одинаковым  $R_0 = 6 \text{ px}$ , что указывает на близкую форму (радиус кривизны) их острий. Более того, радиусы ореолов (центры с ореолами — красная, коричневая и черная линии) также оказались близки друг к другу:  $R_1 \sim 30 \text{ px}$ .

На рис. 2, *a* показан профиль яркости отклика с ореолом (см. вставку на рис. 1, *a*) — зависимость величины средней яркости в кольце  $L_{RA}(R)$ . На вставке представлен профиль того же центра, полученный путем регистрации яркости отдельных пикселей  $L_P$  вдоль горизонтальной и вертикальной линий, проходящих через максимум. Видно, что характер зависимостей, представленных на рис. 2, *a* и вставке к нему, идентичен, однако анализ с усреднением яркости в кольцах дает более гладкую зависимость (как результат отношения двух графиков  $L_R(R)$  и  $A(R)$ , см. нижнюю вставку на рис. 1, *a*).

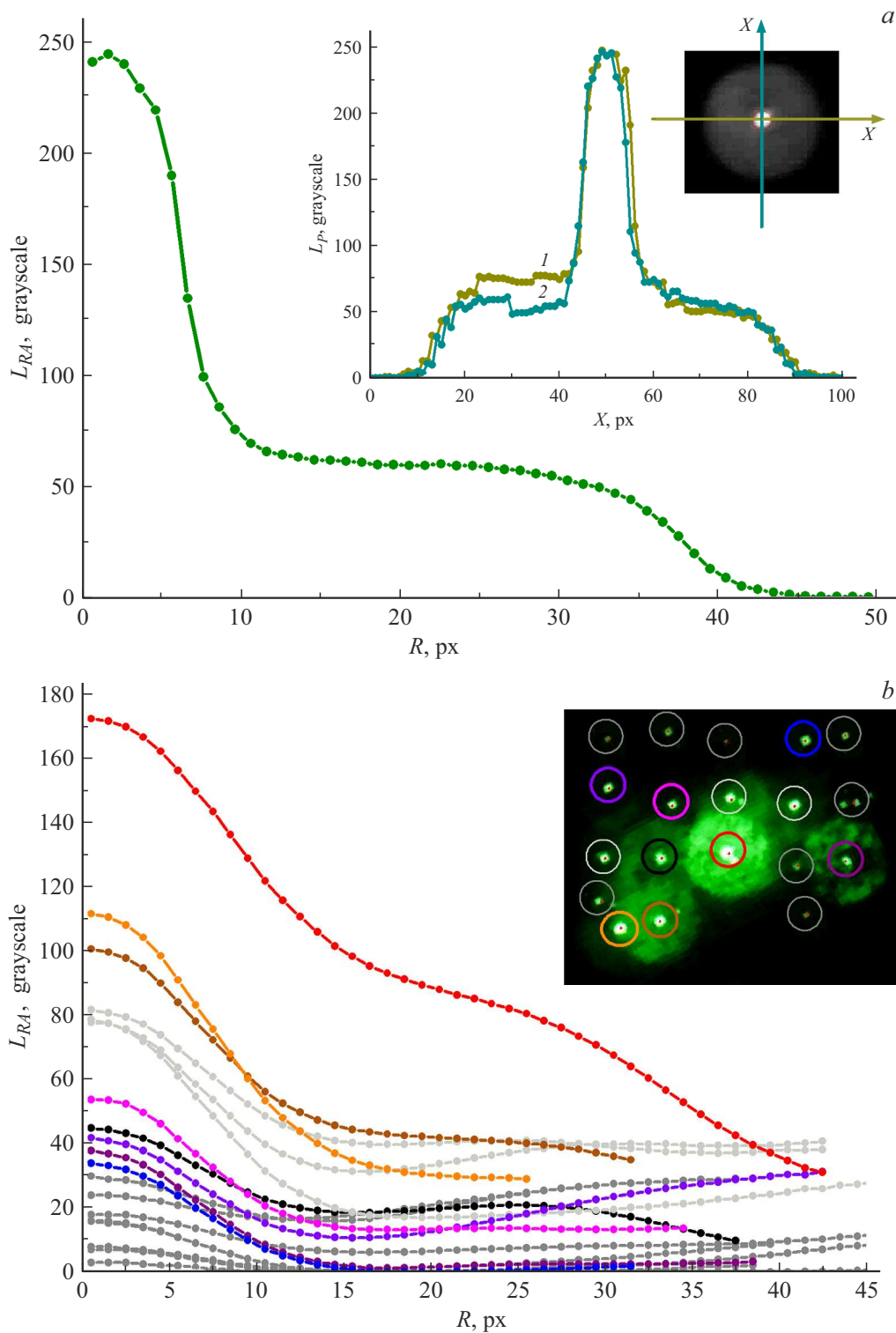
Форма пика на рис. 2, *a* соответствует полученной в работе [7] и близка к параболической зависимости. Отличительной особенностью является наличие ореола в виде горизонтального плеча с почти равномерной яркостью, радиус которого равен  $R_{halo} \sim 45 \text{ px}$ . Если вычесть из радиуса ореола радиус центрального пятна, получим максимальный отскок:  $Z_{\max} = R_{halo} - R_0 = 39 \text{ px} = 780 \mu\text{m}$ . Расстояние между вершинами эмиттеров и анодом составляет  $d_{sep} = d_{A-C} - H \approx 370 \mu\text{m}$ . Таким образом, расстояние  $2d_{sep} = 740 \mu\text{m}$  действительно близко к максимальному расстоянию отскока.



**Рис. 1.** Зависимость от расстояния до центра эмиссии  $R$  суммарной яркости в круге и в кольце светового отклика. *a* — величины  $L_C$  и  $L_R$  для отдельного центра эмиссии с ореолом. На верхней вставке показан световой отклик, на нижней — зависимости площади кольца  $A$  от его радиуса  $R$ : идеальная (черные точки) и рассчитанная по пикселям (красная кривая). *b* — величины  $L_R$  для 19 центров эмиссии в составе матрицы с частично перекрывающимися световыми откликами на картине свечения. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

На рис. 2, *b* показаны зависимости  $L_{RA}(R)$  для эмиссионных центров, найденных на картине свечения мат-

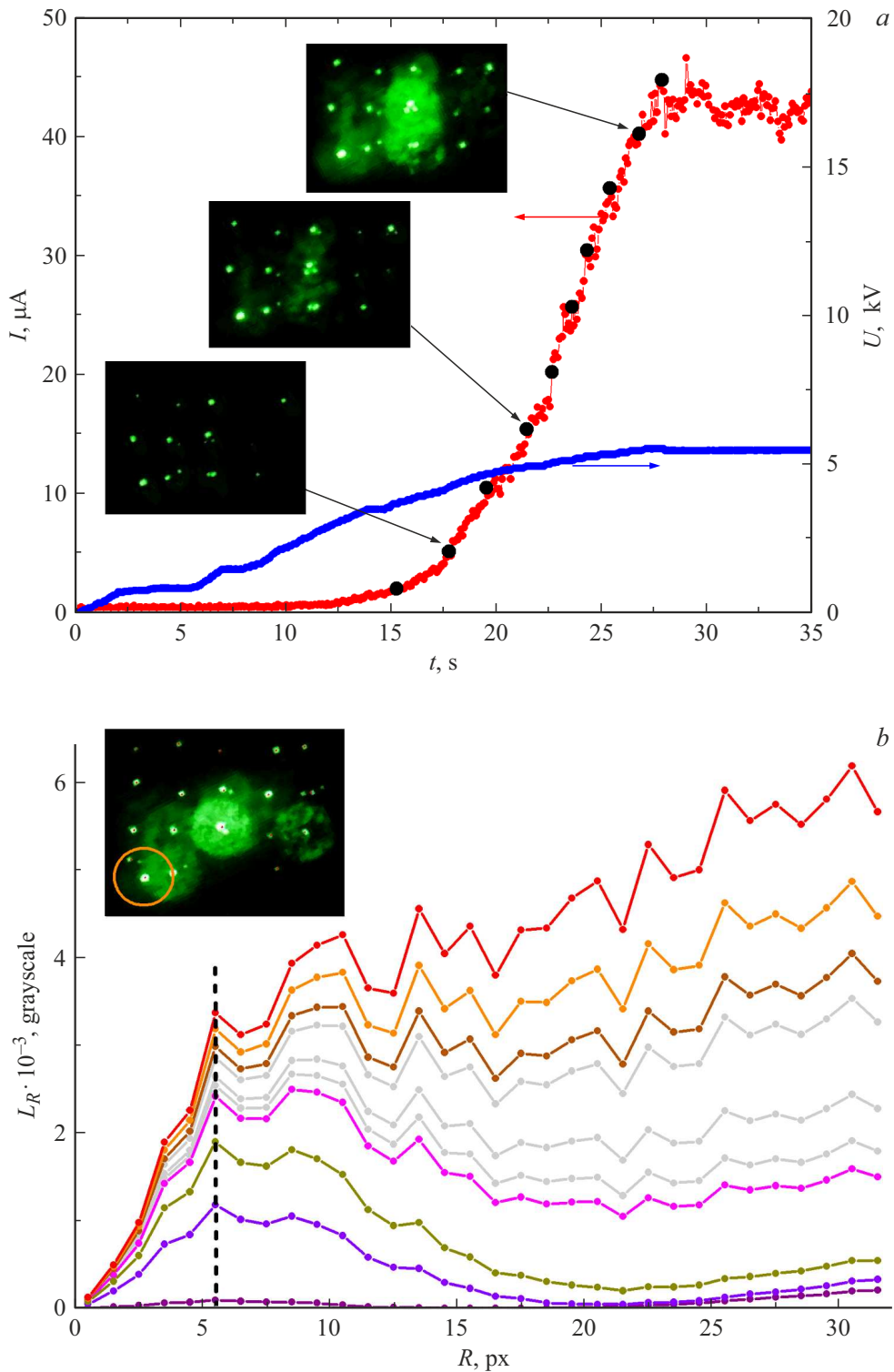
рицы из эмиттеров. Уточнение пиков яркости и их сортировка показали, что ореолами обладают самые



**Рис. 2.** Профили яркости световых откликов — зависимости величины  $L_{RA}$ . *a* — отклик с ореолом. На вставке — профиль яркости пикселей  $L_P$  вдоль горизонтальной (1) и вертикальной (2) линий. *b* — зависимости всех 19 откликов. На вставке показана картина свечения, где центры эмиссии обозначены кружками, цвет которых совпадает с цветом соответствующей кривой на основной части рисунка. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

активные (яркие) эмиттеры. Это может быть связано с тем, что у люминофора есть предел свечения, и недостаточно высокие плотности эмиссионного тока могут

не вызывать видимого свечения в этой области. Самый яркий центр имеет поблизости еще один неразрешенный программой максимум, что делает зависимость (красная



**Рис. 3.** Вариация яркости картины свечения. *a* — зависимости от времени уровней эмиссионного тока и напряжения. На вставках показаны картины свечения, полученные в указанные стрелками моменты времени. *b* — изменение зависимости суммарной яркости кольца от радиуса при изменении уровня тока (кривые соответствуют точкам на фрагменте *a*, вертикальная штриховая линия показывает стабильность радиуса  $R_0$ ) для одного эмиссионного центра, представленного на вставке.

линия) в области ореола пологой, а не горизонтальной. Перекрытие двух откликов (оранжевая и коричневая линии) приводит к тому, что центр отклика без ореола

становится ярче центра отклика с ореолом. Также перекрытие приводит к тому, что профиль яркости откликов без ореола при больших  $R$  не опускается до нуля (синяя

и малиновая кривые). Отметим, что профили яркости откликов, не имеющих перекрытия с ореолами соседей, могут быть достаточно хорошо аппроксимированы кривой Гаусса.

Итак, структура отсвета может быть описана суммой трех функций

$$L(R) = f_{Gauss}(R) + f_{halo}(R) + f_{overlap}(R), \quad (2)$$

где функция  $f_{Gauss}(R)$  имеет перегиб в области радиуса  $R_0$  и описывает прямой отклик потока электронов на люминофоре, функция  $f_{halo}(R)$  имеет вид постоянной добавки, ограниченной радиусом  $R_{halo} \sim 4d_{sep}$ , функция  $f_{overlap}(R)$  отвечает за эффект наложения ореолов соседних откликов (паразитная засветка) и также имеет вид постоянной добавки.

На рис. 3, *a* показана вариация приложенного к образцу напряжения и соответствующего эмиссионного тока (с шагом  $\sim 5 \mu\text{A}$ ). На вставках представлено изменение картины свечения с ростом уровня тока. При малых токах световые отклики эмиттеров хорошо разделены и не перекрывают друг друга. При токах выше  $15 \mu\text{A}$  вокруг самых ярких точек начинают появляться ореолы и добавлять соседним откликам яркости. Паразитное повышение яркости некоторых откликов приводит к завышенным локальным токам, которые достаются им при распределении, а также к понижению локальных токов, которые получают обособленные отклики.

Анализ всех полученных картин свечения показал, что размер эмиссионной площади откликов  $R_0$ , так же как и размер ореолов, с уменьшением напряжения не меняется: и центральное пятно, и ореол просто становятся тусклее, пока совсем не выйдут за пределы диапазона регистрации.

На рис. 3, *b* показано изменение профиля одного светового отклика (зависимость суммарной яркости пикселей в кольце от радиуса кольца  $L_R(R)$ ) при изменении уровня тока. Вертикальная штриховая линия показывает стабильность радиуса  $R_0$  (положения первого пика). Из-за взаимного перекрытия откликов профиль ореола (точки с  $R > R_0$ ) имеет форму, отличную от профиля отдельного отклика (рис. 1, *a*), и сильно меняется с ростом тока.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] N.V. Egorov, E.P. Sheshin, *Field emission electronics*. Springer Ser. in Advanced Microelectronics (Springer, Cham, 2017), vol. 60. DOI: 10.1007/978-3-319-56561-3
- [2] А.С. Чепусов, *Свойства автоэмиссионных катодов из углеродных материалов в условиях технического вакуума*, канд. дис. (Ин-т электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, 2018). [https://clar.urfu.ru/bitstream/10995/72406/1/urfu2010\\_d.pdf](https://clar.urfu.ru/bitstream/10995/72406/1/urfu2010_d.pdf)
- [3] R. Patra, A. Singh, V.D. Vankar, S. Ghosh, *Adv. Mater. Lett.*, **7** (10), 771 (2016). DOI: 10.5185/amlett.2016.6368
- [4] Y. Shiratori, K. Furuichi, S. Noda, H. Sugime, Y. Tsuji, Z. Zhang, Y. Yamaguchi, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **47** (6R), 4780 (2008). DOI: 10.1143/JJAP.47.4780
- [5] D. Lysenkov, H. Abbas, G. Müller, J. Engstler, K.P. Budna, J.J. Schneider, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **23** (2), 809 (2005). DOI: 10.1116/1.1868696
- [6] A.G. Kolosko, S.V. Filippov, E.O. Popov, *St. Petersburg Polytech. Univ. J. — Physics and Mathematics*, **16** (1.2), 39 (2023). DOI: 10.18721/JPM.161.205
- [7] M. Marchand, C. Journet, C. Adessi, S.T. Purcell, *Phys. Rev. B*, **80** (24), 245425 (2009). DOI: 10.1103/PhysRevB.80.245425
- [8] К.Н. Никольский, А.С. Батурич, А.И. Князев, Р.Г. Чесов, Е.П. Шешин, *ЖТФ*, **74** (2), 110 (2004). <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/8190> [К.Н. Nikolski, A.S. Baturin, A.I. Knyazev, R.G. Tchesov, E.P. Sheshin, *Tech. Phys.*, **49** (2), 250 (2004). DOI: 10.1134/1.1648964].
- [9] E.O. Popov, A.G. Kolosko, S.V. Filippov, E.I. Terukov, R.M. Ryazanov, E.P. Kitsyuk, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **38** (4), 043203 (2020). DOI: 10.1116/6.0000072
- [10] Н.А. Дюжев, Г.Д. Демин, Н.А. Филиппов, И.Д. Евсиков, П.Ю. Глаголев, М.А. Махиборода, Н.И. Чхало, Н.Н. Салашенко, С.В. Филиппов, А.Г. Колоско, Е.О. Попов, В.А. Беспалов, *ЖТФ*, **89** (12), 1836 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2019.12.48479.137-19 [N.A. Djuzhev, G.D. Demin, N.A. Filippov, I.D. Evsikov, P.Yu. Glagolev, M.A. Makhaboroda, N.I. Chkhalo, N.N. Salashchenko, S.V. Filippov, A.G. Kolosko, E.O. Popov, V.A. Bespalov, *Tech. Phys.*, **64** (12), 1742 (2019). DOI: 10.1134/S1063784219120053].