

13.2;13.4

## Особенности характеристик солнечно-слепых электронно-оптических преобразователей с алмазными фотокатодами

© В.А. Беспалов<sup>1</sup>, Э.А. Ильичёв<sup>1</sup>, И.П. Казаков<sup>2</sup>, Г.А. Кирпиленко<sup>1</sup>, А.И. Козлитин<sup>3</sup>,  
П.В. Минаков<sup>4</sup>, В.В. Сарайкин<sup>3</sup>, А.В. Клековкин<sup>2</sup>, С.В. Куклев<sup>5</sup>, Г.Н. Петрухин<sup>1,6</sup>,  
Г.С. Рычков<sup>1</sup>, Д.С. Соколов<sup>5</sup>, Е.Г. Твердовская<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет „МИЭТ“, Зеленоград, Москва, Россия

<sup>2</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup> Научно-исследовательский институт физических проблем, Зеленоград, Москва, Россия

<sup>4</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>5</sup> ООО „МЭЛЗ ФЭУ“, Зеленоград, Москва, Россия

<sup>6</sup> ООО „Си Эн Эл Девайсез“, Зеленоград, Москва, Россия

E-mail: edil44@mail.ru

Поступило в Редакцию 22 июля 2020 г.

В окончательной редакции 25 января 2021 г.

Принято к публикации 26 января 2021 г.

Представлены результаты исследований ультрафиолетовых солнечно-слепых электронно-оптических преобразователей с сенсорными слоями фотокатодов из поликристаллических легированных бором алмазных пленок, впервые выращенных на сапфире. Спектральный диапазон чувствительности составляет величину 180–250 nm, пороговая чувствительность без множителя потока электронов не хуже  $\sim 10^{-9}$  W/Hz<sup>0.5</sup>, спектральная чувствительность 12–15 mA/W.

**Ключевые слова:** алмазный фотокатод, диапазон вакуумного ультрафиолета, электронно-оптический преобразователь, множитель потока электронов.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.09.50897.18480

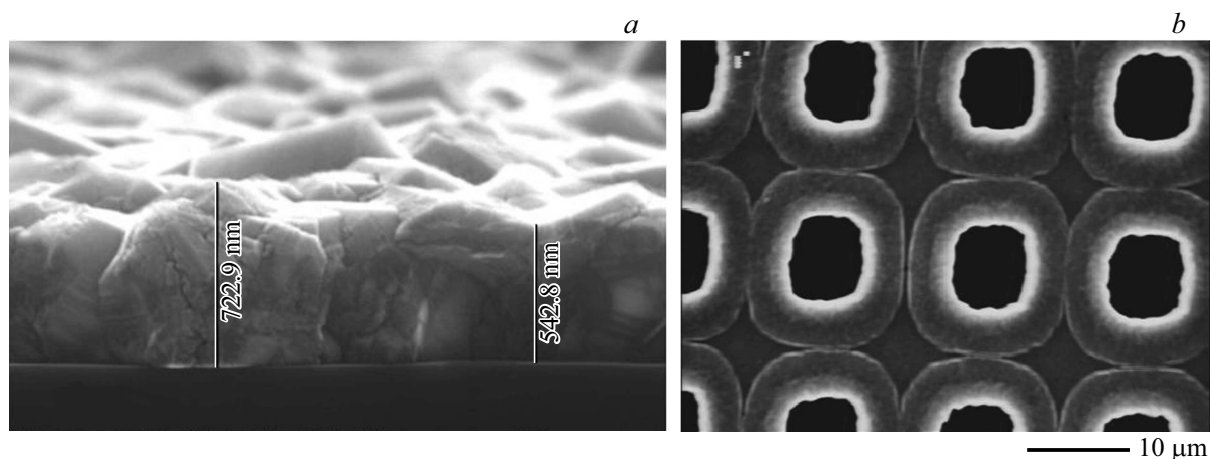
Разработки сенсоров, чувствительных в ультрафиолетовом диапазоне, чрезвычайно актуальны для широкого класса приборных приложений [1], в то же время не наблюдается существенного прогресса в разработках солнечно-слепых (диапазон вакуумного ультрафиолета (ВУФ), 90–290 nm) сенсоров [2,3]. Проблема частично решается применением нелинейных дорогостоящих полосовых фильтров, однако их характеристики являются температурно-зависимыми. Кроме того, они в значительной степени подавляют полезный сигнал. Ключевой проблемой при разработке ВУФ электронно-оптических преобразователей (ВУФ ЭОП) является разработка солнечно-слепого фотокатода. В России разработками солнечно-слепых ультрафиолетовых фотокатодов для ВУФ ЭОП занимается группа исследователей из Зеленограда [4], а разработки УФ-приемников изображений с использованием традиционных бищелочных фотокатодов и нелинейных полосовых фильтров осуществляются в ЦНИИ „Электрон“ (Санкт-Петербург) [5] и НПО „Катод“ (Новосибирск).

Целью настоящей работы является разработка и исследование солнечно-слепых ультрафиолетовых фотокатодов и ВУФ ЭОП на их основе.

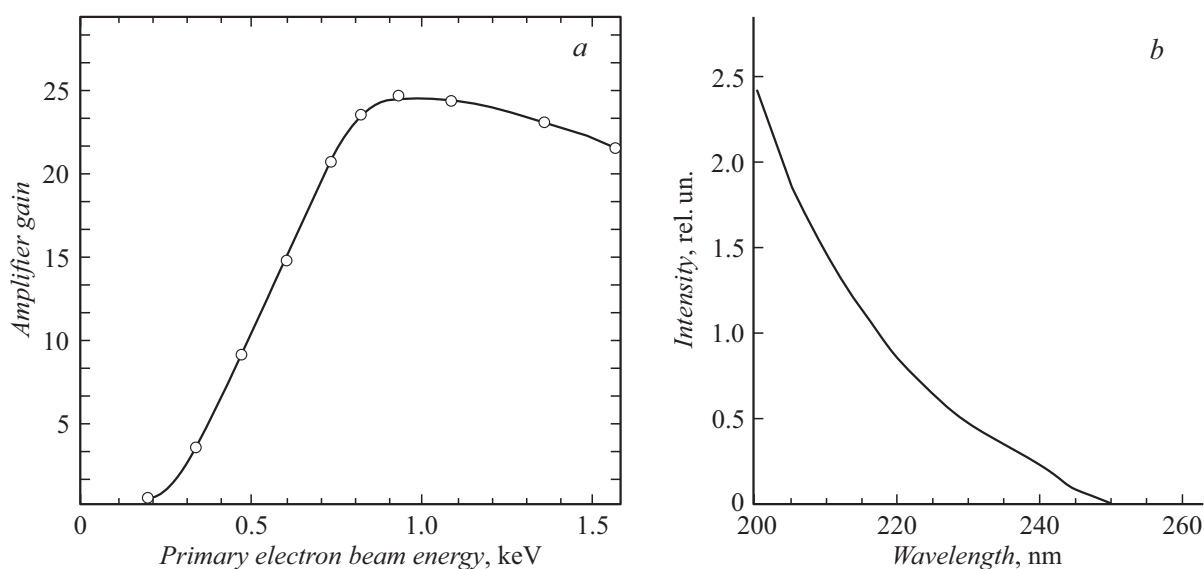
Нами представлены результаты разработок и исследований солнечно-слепых (180–270 nm) ВУФ ЭОП с фотокатодами на основе поликристаллических алмазных пленок, легированных бором. Выбор в качестве сенсорного материала поликристаллических алмазных пленок обусловлен особенностями зонной структуры

алмаза, обеспечивающей отсутствие чувствительности к излучениям видимого и ИК-диапазонов и отрицательную энергию сродства для ряда граней алмаза, допускающих реализацию на прозрачных для излучений подложках схемы „на прострел“ в конструкциях ЭОП. Использование триметилбората в качестве легирующей примеси обусловлено хорошей управляемостью процесса легирования и его малой токсичностью. Формирование сенсорной алмазной пленки на сапфировой подложке нами осуществлялось PECVD-методом (мощность СВЧ  $\sim 1$  kW) с использованием адгезионного подслоя кремния толщиной  $\sim 20$ – $30$  nm и специальным образом приготовленного, нанесенного и фиксированного на адгезионном слое массива из алмазных нанокристаллитов. Расходы водорода и метана составили  $\sim 300$  и  $\sim 15$  cm<sup>3</sup>/min соответственно, давление в газовой смеси  $\sim 30$  Torr, а расход раствора триметилбората в изопропиловом спирте  $\sim 0.002$  cm<sup>3</sup>/min. Температура подложки в процессе роста поддерживалась равной  $\sim 500$ – $600$  °C. Отработка техпроцессов роста и легирования сенсорных пленок сопровождалась контролем качества пленок и уровня легирования посредством изучения спектров комбинационного рассеяния и профиля элементного и фазового состава. Подвижность ( $\sim 1$ – $3$  cm<sup>2</sup>/(V·s)) и проводимость в алмазных поликристаллических пленках (при оптимальной концентрации бора в пленке  $\sim 10^{19}$  cm<sup>-3</sup>) контролировались посредством холловских измерений.

На рис. 1 представлены полученные с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) изображения



**Рис. 1.** РЭМ-изображения скола фотокатода на основе поликристаллической алмазной пленки (а) и фрагмента умножителя потока электронов сетчатой алмазной мембранной конструкции (b).



**Рис. 2.** Типичные умножающие характеристики сетчатых алмазных УПЭ (а) и спектральные характеристики ВУФ ЭОП с алмазным фотокатодом (b).

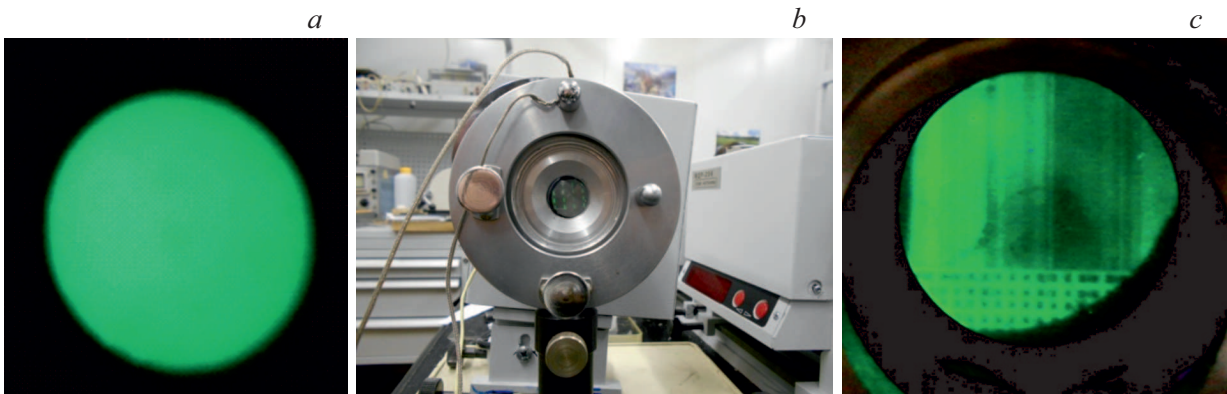
скола образца типичного фотокатода для ВУФ ЭОП, выращенного на сапфировой подложке PECVD-методом (а), и фрагмента типичного образца алмазного умножителя потока электронов (УПЭ) сетчатой мембранной конструкции (b).

Конструирование УПЭ в виде решетки и выбор конкретных размеров ячеек (3–5 μm) и периода (6–10 μm) согласованы с величинами диффузионной длины неравновесных носителей в алмазной пленке и нашими технологическими возможностями. Умножающие характеристики сетчатых алмазных УПЭ в схеме „на прострел“ представлены на рис. 2, а. Метод и схема измерений, а также описание измерительного стенда представлены в [6,7].

Спектральные характеристики ВУФ ЭОП, не содержащих в своей структурной схеме УПЭ, представлены

на рис. 2, b. Они получены с использованием оптической схемы, включающей монохроматор МДР 206 с фотодетектирующим обрамлением и широкоапертурным дейтериевым излучателем ДДС 30. Характеристики спектральной чувствительности ВУФ ЭОП (рис. 2, b) обработаны с учетом особенностей спектральных характеристик фотоприемного устройства монохроматора, излучателя ДДС 30, а также эталонного Si p–n-фотодиода.

Солнечно-слепой характер чувствительности разработанных ВУФ ЭОП дополнительно подтвержден отсутствием у образцов фотореакции на прямые воздействия мощных источников излучений спектральных диапазонов 840–1080 nm (галогенная лампа), 633 nm (He–Ne-лазер), 540 nm (суперлюминесцентный диод), 340–380 nm (светодиод, GaN–AlN).



**Рис. 3.** Картины изображений различных объектов, полученных солнечно-слепым ВУФ ЭОП при разных условиях освещения входного окна излучателем ДДС 30: случай однородного освещения (а); случай освещения сквозь маску, выполненную в виде решетки (b); случай освещения сквозь кварцевый фотошаблон с топологическим рисунком в виде набора прозрачных квадратов либо мер из набора линий с периодом 6–30  $\mu\text{m}$  (с).

Для исключения ряда артефактов (внутренних утечек по корпусу и автоэмиссионной компоненты) пороговая чувствительность ВУФ ЭОП экспериментально оценивалась снизу посредством регистрации излучения с катодно-люминесцентного экрана со стороны выходного окна ЭОП (со стороны волоконной оптической пластины). Предварительно экспериментально определялась доля интегральной мощности излучения лампы ДДС 30, вводимой в приемное окно ЭОП, с последующей коррекцией полученных результатов на внешний квантовый выход Si  $p$ - $n$ -фотодиода ( $\sim 0.30$ – $0.35$ ), отношение активных площадей ( $\sim 2.5$  раза) входного окна ЭОП и приемного окна Si  $p$ - $n$ -фотодиода и на калибровочные данные спектральной зависимости коэффициента преобразования Si  $p$ - $n$ -фотодиода в УФ- и видимой областях оптического диапазона (в рабочей области их отношение составило  $\sim 0.2$  раза). Затем вычислялась доля мощности излучений для линий видимого диапазона лампы ДДС 30 и определялась мощность, приходящаяся только на ВУФ-область. В результате в качестве оценки для мощности излучения, способного генерировать фотоэлектроны (т.е. для мощности излучения диапазона вакуумного ультрафиолета), получена величина  $\sim 50 \mu\text{W}$ . Активная мощность  $50 \mu\text{W}$ , поступающая во входное окно ЭОП, вызывает в цепи эталонного Si  $p$ - $n$ -фотодиода, регистрирующего излучение с катодолуминесцентного экрана, фототок величиной в 250 нА. Таким образом, с учетом отношения площадей выходного окна ВУФ ЭОП и приемного окна фотодиода (2.5 раза) для его спектральной чувствительности получаем величину  $\sim 12$ – $15 \text{ mA/W}$ . Измерения пороговой чувствительности образцов ВУФ ЭОП, включающих УПЭ, и ВУФ ЭОП без УПЭ выполнены с использованием процедуры изменений расстояния от источника ДДС 30 до входного окна ЭОП в диапазоне от 0.2 см (соответствующая мощность  $50 \mu\text{W}$ ) до 25 см (мощность на уровне шума), при которой падающая на входное окно мощность изменялась как квадрат расстояний. В резуль-

тате для пороговой мощности ВУФ ЭОП была получена оценка  $\sim 3 \cdot 10^{-9} \text{ W}$ , что, на наш взгляд, является оценкой снизу. Действительно, измерения пороговых характеристик УФ ЭОП, содержащих УПЭ, нами были выполнены по аналогичной процедуре и дали для пороговой чувствительности величину  $\sim 5 \cdot 10^{-11} \text{ W/Hz}^{0.5}$  при спектральной чувствительности  $\sim 65$ – $75 \text{ mA/W}$  и квантовой эффективности 25–27%. Измерения квантовой эффективности фотокатодов проводились посредством определения отношения потока фотоэлектронов (фототок  $\sim 0.6$ – $0.7 \mu\text{A}$  на электроде сбора) к потоку падающих квантов излучений ( $\sim 5 \cdot 10^{13} \text{ photon/s}$ ) в спектральной области с максимально определенной фоточувствительностью ( $\sim 200 \text{ nm}$ ). Значительная разница в величинах представленных выше пороговой и спектральной чувствительностей конструкторских реализаций ВУФ ЭОП (без УПЭ) и УФ ЭОП, включающего УПЭ, объясняется нами существенным различием (при одинаковых входных мощностях излучений) условий для насыщения каналов безызлучательной рекомбинации в веществе люминофора катодолуминесцентного экрана. Пространственное разрешение УФ ЭОП и ВУФ ЭОП, изученное с использованием эталонных объектов (кварцевое стекло с набором полосок и квадратов), составило  $\sim 70 \text{ line/mm}$ , а поле чувствительности однородно по площади приемного окна (рис. 3).

Таким образом, на основе поликристаллических алмазных пленок, легированных бором, разработана технология получения сенсорно-преобразовательных слоев для солнечно-слепых ВУФ-фотокатодов и умножителей потока электронов. На их основе изготовлены и исследованы экспериментальные образцы солнечно-слепых ВУФ ЭОП.

### Финансирование работы

Работа выполнена с использованием бюджетных средств по госзаданию FSMR-2020-0018 и при под-

держке Фонда содействия инновациям по проекту № 330ГР/23578.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] C.L. Joseph, *Exp. Astron.*, **6**, 97 (1995).
- [2] F. Mendoza, V. Makarov, B.R. Weiner, G. Morel, *Appl. Phys. Lett.*, **107**, 201605 (2015). <https://doi.org/10.1063/1.4936162>
- [3] L. Velardi, A. Valentini, G. Cicala, *Appl. Phys. Lett.*, **108**, 083503 (2016). <http://dx.doi.org/10.1063/1.4942648>
- [4] В.А. Беспалов, В.М. Глазов, Э.А. Ильичёв, Ю.А. Климов, С.В. Куклев, А.Е. Кулешов, Р.М. Набиев, Г.Н. Петрухин, Б.Г. Потапов, Г.С. Рычков, Д.С. Соколов, В.В. Фандеев, С.С. Якушов, *ЖТФ*, **85** (4), 74 (2015).
- [5] М.Р. Айнбунд, И.С. Васильев, Е.Г. Вилькин, Л.Г. Забелина, Е.Е. Левина, А.В. Пашук, А.С. Петров, Т.А. Русонова, Р.М. Степанов, И.Н. Суриков, *Прикладная физика*, № 4, 97 (2006).
- [6] V.V. Dvorkin, N.N. Dzbanovsky, N.N. Suetin, E.A. Poltoratsky, G.S. Rychkov, E.A. Il'ichev, S.A. Gavrilov, *Diamond Relat. Mater.*, **12**, 2208 (2003).  
DOI: 10.1016/S0925-9635(03)00320-0
- [7] E.A. Il'ichev, A.E. Kuleshov, E.A. Poltoratskii, G.S. Rychkov, *Diamond Relat. Mater.*, **20**, 23 (2011).  
<https://doi.org/10.1016/j.diamond.2010.11.002>