

УДК 537.9

ФОТОЭМИССИОННЫЕ СВОЙСТВА МУЛЬТИЩЕЛОЧНОГО ФОТОКАТОДА

© В. С. Русецкий^{1,3}, В. А. Голяшов^{1,2}, А. В. Миронов³,
А. Ю. Дёмин³, О. Е. Терещенко^{1,2}

¹Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13

²Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1

³ЗАО «Экран ФЭП»,
630060, г. Новосибирск, ул. Зелёная горка, 1
E-mail: vadim19230495@yandex.ru

Продемонстрирована возможность исследований фотоэмиссионных свойств мультищелочных фотокатодов (МФ) в вакуумных фотодиодах с двумя полупроводниковыми электродами. Исследованы спектральные зависимости фотолюминесценции и квантового выхода МФ, впервые получены спектры распределения фотоэлектронов по энергиям в МФ с высоким разрешением. Измерения проводились при освещении МФ монохроматичным светом в диапазоне длин волн 400–950 нм и температурном интервале 90–300 К. На основе полученных данных сделаны выводы о наличии эффективного отрицательного электронного средства в МФ. Изучены свойства исследуемого вакуумного фотодиода как солнечного элемента.

Ключевые слова: мультищелочной фотокатод, распределение фотоэлектронов по энергиям, вакуумный фотодиод, солнечный элемент, эффективное отрицательное электронное средство.

DOI: 10.15372/AUT20210508

Введение. Антимониды щелочных металлов остаются востребованными материалами на протяжении более 60 лет и находят применение в качестве источников электронов для ускорителей [1, 2]. Ведутся исследования по вакуумным фотоэлементам [3]. Наиболее распространённым представителем данной группы материалов является мультищелочной фотокатод (МФ) $\text{Na}_2\text{KSb:Cs}$, который используется при изготовлении электронно-оптических преобразователей (ЭОП) и фотоэлектронных умножителей (ФЭУ). Данный фотокатод считается альтернативой более современному типу фотокатодов на основе GaAs:Cs-O . Недостаток МФ — относительно низкий квантовый выход (15–20 % против 35–40 % у GaAs:Cs-O). Однако данный тип фотокатодов остаётся востребованным благодаря дешевизне производства и значительно меньшей восприимчивости к остаточной атмосфере вакуумной камеры. Также имеются данные о возможном увеличении квантового выхода из МФ [4].

Несмотря на широкую область применения далеко не все свойства МФ изучены хорошо. Исследование свойств МФ является важной задачей, так как позволяет определить возможные пути улучшения характеристик и найти новые области использования данного типа фотокатодов. В литературе имеются данные по расчёту зонной структуры, например [1, 5], а также по спектральным зависимостям квантового выхода и фотопроводимости в МФ [6]. Информативным методом, позволяющим изучать фотоэмиссионные характеристики фотокатодов, является исследование спектров распределения фотоэмитированных электронов по энергии (energy distribution curve, EDC) [7]. Для МФ детальное исследова-

ния энергетического распределения фотоэмитированных электронов практически не проводились [8].

Цель данной работы — исследование фотоэмиссионных свойств МФ в вакуумных фотодиодах.

Описание эксперимента. Проведение исследований фотоэмиссионных свойств фотокатодов в общем случае требует сверхвысоковакуумной камеры, содержащей изучаемый материал, систему электронных линз и энергоанализатор. Данную систему можно упростить до вакуумного фотодиода, электродами которого являются исследуемые фотокатоды. Ранее уже были изготовлены подобные вакуумные фотодиоды с гетероструктурами A_3B_5 и было продемонстрировано удобство данной системы для изучения эмиссионных и инжекционных свойств материалов [9–12].

Экспериментальный вакуумный фотодиод схематично изображён на рис. 1, *a*. Такой фотодиод представляет собой цилиндрический корпус, выполненный из алюмооксидной керамики, на торцах которого закреплены металlostеклянные узлы с исследуемыми фотокатодами. Так как они выращены одновременно в одной ростовой камере, то имеют идентичные параметры. Приблизительная толщина фотокатодов составляет 130–140 нм. Диаметр рабочих областей фотокатодов равен 20 мм, межэлектродное расстояние — 1 мм. В данной работе один из фотокатодов условно обозначен ФК1, а второй — ФК2. Освещение фотодиода производилось со стороны ФК1 на площади 2×1 мм. В данном вакуумном фотодиоде любой из электродов может играть роль и катода, и анода, что позволяет измерять вольт-амперные характеристики (рис. 1, *b*) и составляющую энергии фотоэлектронов, поперечную поверхности фотокатода, используя фотодиод как энергоанализатор задерживающего потенциала. Методика измерения спектров распределения фотоэлектронов по энергии подробно описана в [9]. В силу того что МФ имеют достаточно малую толщину (140 нм), в широком спектральном диапазоне наблюдается значительный вклад в фототок как от ФК1, так и от ФК2, причём ФК1 работает в режиме «на просвет», а ФК2 — «на отражение». Также следует отметить, что при нулевом напряжении на данном фотодиоде в широком спектральном диапазоне наблюдается фототок.

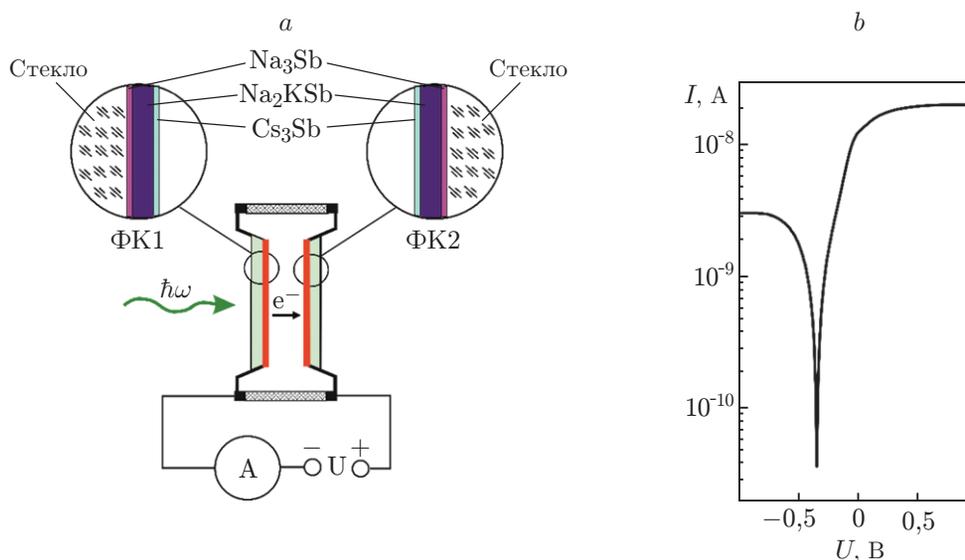


Рис. 1. Вакуумный фотодиод с двумя МФ: схематичное изображение используемого вакуумного фотодиода (*a*); вольт-амперная характеристика вакуумного фотодиода при освещении ФК1 светом с длиной волны 500 нм при температуре 300 К (*b*)

Результаты и обсуждение. На рис. 2 представлены сравнительные спектры квантового выхода и его производной, а также спектры фотолюминесценции (ФЛ) для исследуемых фотокатодов в окрестности спада их чувствительности (780–950 нм) при температурах 90 и 300 К. При измерении спектров фотолюминесценции вакуумный фотодиод освещался лазером с длиной волны 405 нм. Из спектров ФЛ можно оценить ширину запрещённой зоны фотокатодов: 1,40 эВ при $T = 300$ К и 1,49 эВ при $T = 90$ К. Отметим, что максимум спектра ФЛ и спад квантового выхода (удобно отследить по максимуму производной квантового выхода) достаточно точно совпадают и одинаково меняются с температурой, при этом величина квантового выхода при длинах волн вблизи максимума ФЛ (ширины запрещённой зоны) фотокатода остаётся достаточно высокой (6–10 %). Это означает наличие эффективного нулевого или эффективного отрицательного электронного сродства в данных МФ.

На рис. 3 приведены спектры распределения фотоэлектронов по энергии в исследуемых фотокатодах при возбуждающем излучении в диапазоне длин волн 500–980 нм при температуре 300 К. На имеющихся спектрах отчётливо виден вклад как от первого, так и от второго фотокатода, а также заметно значительное количество горячих электронов при освещении светом с энергией, превышающей ширину запрещённой зоны в МФ. Наличие сигнала при освещении фотокатода светом с длиной волны 900 нм и более, вероят-

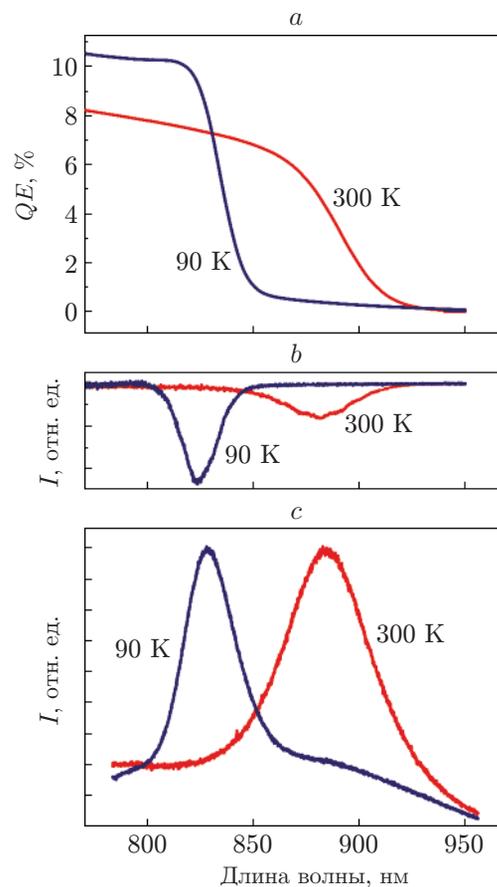


Рис. 2. Спектральные характеристики исследуемого МФ при температурах 90 и 300 К: спектры квантового выхода в диапазоне длин волн 780–950 нм (a); первые производные спектров квантового выхода (b); спектры фотолюминесценции фотокатода (c)

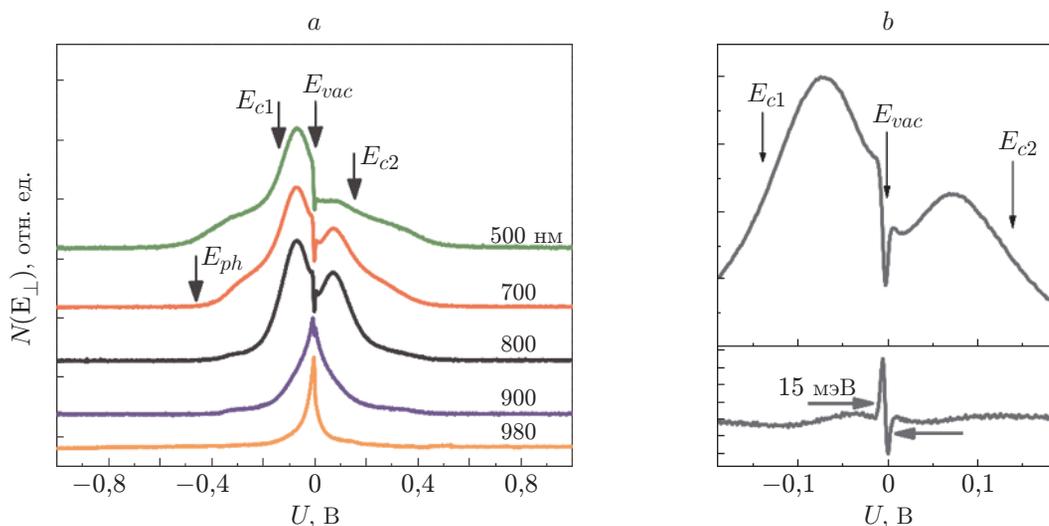


Рис. 3. Спектры распределения фотоэлектронов по энергии (EDC) при температуре 300 К при различных длинах волн возбуждающего излучения (а); EDC и его производная при освещении светом с длиной волны 700 нм при $T = 300$ К в окрестности нулевого задерживающего потенциала (б)

но, обусловлено переходами и эмиссией из поверхностных состояний. На рис. 3 показано положение уровня вакуума для фотокатодов (E_{vac}), а также положения энергий, соответствующих дну зоны проводимости в МФ (E_{c1} и E_{c2}). Для оценки положения энергии дна зоны проводимости использовалось соотношение $E_c = E_{ph} - (\hbar\omega - E_g)/(1 + m_e^*/m_h^*)$, где E_{ph} — максимальная энергия эмитированного фотоэлектрона над уровнем вакуума при данной энергии фотона (рис. 3, а), $\hbar\omega$ — энергия фотона, E_g — ширина запрещённой зоны фотокатода, полученная из спектра ФЛ, $m_e^* \approx 0,39m_e$ и $m_h^* \approx 2,88m_e$ — приведённые массы электрона и дырки в МФ, оценённые из расчётов закона дисперсии для соединения Na_2KSb [5]. Из анализа измеренных EDC была оценена величина эффективного отрицательного электронного сродства в исследуемых МФ: около 0,14 эВ. Следует отметить достаточно резкое изменение EDC вблизи уровня вакуума фотокатода. На рис. 3, б видно, что данное изменение укладывается в диапазон напряжений 10–15 мэВ, и это свидетельствует о достаточно высоком разрешении по напряжению (энергии) в данном типе анализатора.

Так как в данном вакуумном фотодиоде наблюдается фототок без приложения внешнего поля, существует возможность оценить эффективность данного прибора как солнечного элемента. Его основной параметр — коэффициент преобразования энергии, который для данного фотодиода можно оценить из следующего соотношения [11]:

$$\eta = \frac{P_{\max}}{\hbar\omega N_{ph}} = \frac{U^* I^*}{\hbar\omega N_{ph}} = \frac{e^2 U^*}{\hbar\omega I_{sat}} QE, \quad (1)$$

где $P_{\max} = U^* I^*$ — максимальное значение электрической мощности солнечного элемента (рис. 4); $N_{ph} = N_e/QE$ — количество падающих фотонов; $I_{sat} = eN_e$ — ток насыщения, полученный из вольт-амперной характеристики; QE — квантовый выход фотокатода; e — заряд электрона. Из формулы (1) видно, что коэффициент преобразования энергии прямо пропорционален величине квантового выхода.

На рис. 5, а представлены спектры квантового выхода для фотокатодов исследуемого вакуумного фотодиода при различных ускоряющих напряжениях (0–0,5 В). Полученные спектры можно разделить (пунктирная линия) на 2 области: в верхней области преоблада-

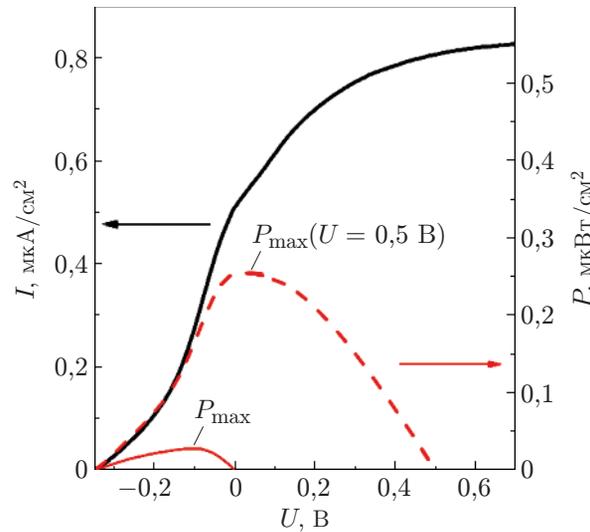


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика (утолщённая сплошная линия, левая шкала) и зависимость электрической мощности исследуемого фотодиода от напряжения при освещении излучением с длиной волны 500 нм при $U = 0$ В (тонкая сплошная линия, правая шкала) и при $U = +0,5$ В (пунктирная линия, правая шкала)

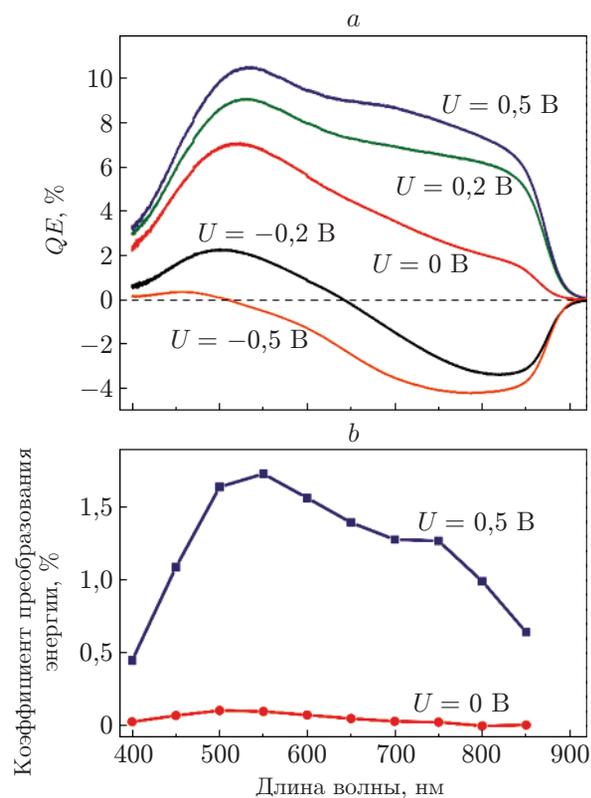


Рис. 5. Спектральные характеристики солнечного элемента на основе используемого вакуумного фотодиода: спектры квантового выхода при различных ускоряющих напряжениях при температуре 300 К (а), коэффициент преобразования энергии при $U = 0$ В (точки) и при $U = +0,5$ В (квадраты) (б)

ет эмиссия из ФК1, в нижней — эмиссия из ФК2. Отметим, что при нулевом ускоряющем напряжении квантовый выход фотокатода заметно снижается. Причиной может являться то, что практически во всём спектральном диапазоне работы фотодиода происходит фотоэмиссия с обоих фотокатодов, и, следовательно, сказывается значительное влияние пространственного заряда. Также имеет место значительное рассеяние фотоэлектронов с энергиями, близкими к уровню вакуума. Максимальное значение коэффициента преобразования энергии оказалось равным 0,1 % при длине волны падающего света 500 нм (рис. 5, *b*). Основным фактором, снижающим коэффициент преобразования энергии, является отсутствие значительной разности потенциала холостого хода, поскольку фотокатоды имеют близкие значения работы выхода ($\Delta\varphi \approx 0$ эВ). Если предположить по аналогии с [11], что вместо второго фотокатода будет установлен электрод с пониженной работой выхода ($\Delta\varphi \approx 0,5$ эВ), то коэффициент преобразования энергии может вырасти более чем на порядок (см. рис. 4, 5). Дополнительным способом увеличения коэффициента преобразования энергии может стать повышение квантового выхода фотокатода за счёт оптимизации его структуры.

Заключение. В данной работе показана эффективность использования вакуумного фотодиода для исследования фотоэмиссионных свойств мультищелочных фотокатодов. Впервые получены спектры распределения фотоэлектронов для МФ с высоким разрешением. Ожидается, что измерения спектров распределения фотоэлектронов по энергиям квантового выхода и фотолюминесценции (в том числе поляризованной) позволят уточнить модель фотоэмиссии из МФ, а также определить эффективность данного материала как источника спин-поляризованных электронов для ускорителей.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-32-90152).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Musumeci P., Giner Navarro J., Rosenzweig J. B. et al.** Advances in bright electron sources // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2018. **907**. P. 209–220.
2. **Cocchi C., Mistry S., Schmeiber M. et al.** Electronic structure and core electron fingerprints of caesium-based multi-alkali antimonides for ultra-bright electron sources // Sci. Rep. 2019. **9**. 18276.
3. **Wang G., Chang B., Li X. et al.** Solar energy conversion through thermally enhanced external photoelectric emission from NaCsSb photocathodes // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2017. **159**. P. 73–79.
4. **Orlov D. A., De Fazio J., Duarte Pinto S. et al.** High quantum efficiency S-20 photocathodes in photon counting detectors // Journ. Instrum. 2016. **11**. C04015.
5. **Ettema A. R. H. F., de Groot R. A.** Electronic structure of Na₃Sb and Na₂KSb // Phys. Rev. B. 2000. **61**. 10035.
6. **Spicer W. E.** Photoemissive, photoconductive, and optical absorption studies of alkali-antimony compounds // Phys. Rev. 1958. **112**. P. 114.
7. **Терехов А. С., Орлов Д. А.** Тонкая структура спектров термализованных фотоэлектронов, эмитированных из GaAs с отрицательным электронным сродством // Письма в ЖЭТФ. 1994. **59**, № 12. С. 827–831.
8. **Бегучев В. П., Шефова И. А., Шульгина М. Н.** Исследование распределения фотоэлектронов по энергиям из многощелочного фотокатода Na₂KSbCsO // ЖТФ. 1988. **58**, № 8. С. 1594–1597.

9. **Rodionov A. A., Golyashov V. A., Chistokhin I. B. et al.** Photoemission and injection properties of a vacuum photodiode with two negative-electron-affinity semiconductor electrodes // Phys. Rev. Appl. 2017. **8**, Iss. 3. 034026.
10. **Golyashov V. A., Rusetsky V. S., Shamirzaev T. S. et al.** Spectral detection of spin-polarized ultra low-energy electrons in semiconductor heterostructures // Ultramicroscopy. 2020. **218**. P. 113076.
11. **Tereshchenko O. E., Golyashov V. A., Rodionov A. A. et al.** Solar energy converters based on multi-junction photoemission solar cells // Sci. Rep. 2017. **7**, Iss. 1. P. 16154.
12. **Tereshchenko O. E., Golyashov V. A., Rusetsky V. S. et al.** A new imaging concept in spin polarimetry based on the spin-filter effect // Journ. Synchrotron Rad. 2021. **28**. P. 864–875.

Поступила в редакцию 04.08.2021

После доработки 13.08.2021

Принята к публикации 23.08.2021
