

УДК 621.315.592

## Перенос фотоэлектронов через границу $p$ -GaAs(Cs, O)–вакуум с положительным и отрицательным электронным сродством

© В.С. Хорошилов<sup>1,2</sup>, Г.Э. Шайблер<sup>1,2</sup>, Д.М. Казанцев<sup>1,2</sup>, С.А. Рожков<sup>1,2</sup>, В.Л. Альперович<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

E-mail: alper\_v@mail.ru

Поступила в Редакцию 26 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 27 апреля 2024 г.

Принята к публикации 27 апреля 2024 г.

Изучена эволюция энергетических распределений электронов, эмитированных из  $p$ -GaAs(Cs, O), при переходе от отрицательного к положительному эффективному электронному сродству при нанесении избыточного цезия. Установлено, что при адсорбции избыточного цезия эволюция энергораспределений обусловлена как увеличением работы выхода поверхности, так и снижением вероятности выхода электронов в вакуум. Результаты сопоставлены с экспериментом по адсорбции избыточного кислорода. Изменения вероятности выхода связаны, предположительно, с отражением или рассеянием электронов на двумерных цезиевых кластерах с металлическим спектром элементарных возбуждений.

**Ключевые слова:** фотоэмиссия, GaAs, отрицательное электронное сродство, вероятность выхода электронов в вакуум.

DOI: 10.61011/FTP.2024.05.58756.6336H

### 1. Введение

Исследование переноса фотоэлектронов через границу полупроводник–вакуум представляет как научный, так и практический интерес. Научный интерес связан с вопросами о механизмах превращения квазичастицы в кристалле в свободный электрон в вакууме, а также рассеяния энергии, импульса и спина фотоэлектронов на границе. Выяснение этих вопросов имеет практический интерес, обусловленный использованием фотоэмиссии как метода исследования электронной структуры твердых тел [1,2] и физической основы работы полупроводниковых фотокатодов [3–6]. Известно, что адсорбция цезия и кислорода на поверхности  $p$ -GaAs снижает потенциальный барьер для выхода электронов в вакуум до состояния с отрицательным эффективным электронным сродством (ОЭС)  $\chi^* \approx -0.2$  эВ, при котором уровень вакуума лежит ниже дна зоны проводимости в объеме полупроводника. Это обеспечивает высокий квантовый выход эмиссии ОЭС-фотокатодов [3,4]. Поверхности  $p$ -GaAs с относительно небольшим ( $\chi^* \approx 0.2–0.4$  эВ) положительным электронным сродством (ПЭС) также привлекают внимание в связи с предложенной в [7,8] возможностью повышения эффективности преобразования солнечной энергии. Несмотря на то что практическая реализация этой возможности вызывает сомнения из-за низкой вероятности выхода электронов из  $p$ -GaAs в вакуум [9], изучение перехода между состояниями с ОЭС и ПЭС на поверхности  $p$ -GaAs(Cs, O) оказалось полезным для выяснения механизмов фотоэмиссии [10–12].

В работах [10–12] переход между состояниями с ОЭС и ПЭС при адсорбции цезия и кислорода на поверхности  $p$ -GaAs изучался методом спектроскопии квантового выхода фотоэмиссии. В состоянии ПЭС в спектрах фотоэмиссии наблюдалось два порога. Высокоэнергетический порог связан с прямой фотоэмиссией электронов, рожденных в зоне проводимости с энергией выше уровня вакуума при межзонных оптических переходах. Второй порог при энергии фотонов, равной ширине запрещенной зоны, обусловлен так называемой фотонно-усиленной термоэлектронной эмиссией (photon-enhanced thermionic emission, PETE) электронов, которые родились ниже уровня вакуума и приобрели необходимую для эмиссии энергию от кристаллической решетки, в процессе термализации вверх по энергии за счет поглощения фононов [7–9]. По положению спектрального порога прямой фотоэмиссии в работах [10–12] определялось эффективное электронное сродство  $\chi^*$ . Вероятности выхода горячих и термализованных электронов  $P_h$  и  $P_t$  были получены из сопоставления экспериментальных спектров квантового выхода с расчетом и имели смысл амплитуд вкладов прямой фотоэмиссии и PETE в полный спектр фототока. Было установлено, что вероятности выхода  $P_h$  и  $P_t$  сложным образом зависят от величины сродства  $\chi^*$ , принимая значения от существенно меньших единицы ( $10^{-2}–10^{-1}$ ) в области ПЭС до близких к 0.5 в области ОЭС. Эти результаты согласуются с гипотезой о малости вероятности выхода электронов в вакуум при однократном соударении с поверхностью [13,14]. При этом сравнительно большой квантовый выход фотоэмиссии из  $p$ -GaAs(Cs, O) с ОЭС

обеспечивается, предположительно, захватом электронов на квантово-размерные состояния, локализованные в области поверхностного изгиба зон, и „многократными соударениями“ с поверхностью за время жизни на этих состояниях [5,6,12,14]. Другой важный факт состоит в том, что экспериментальные зависимости  $P_{h,t}(\chi^*)$  оказались неоднозначными [10–12]. В частности, при нанесении цезия на чистую поверхность  $p$ -GaAs(001) значения  $P_{h,t}$  в области Cs-покрытий  $\theta > 0.5$  монослая (МС) оказались меньше, чем при таких же  $\chi^*$  в области  $\theta < 0.5$  МС [10]. Было установлено также, что при адсорбции избыточного цезия на поверхности  $p$ -GaAs(Cs, O) с ОЭС и переходе от ОЭС к ПЭС зависимости  $P_{h,t}(\chi^*)$  лежат ниже, чем при аналогичном переходе, вызванном экспозицией в избыточном кислороде [11,12]. Эти результаты свидетельствовали о цезий-индуцированном снижении вероятностей выхода фотоэлектронов в вакуум.

Спектроскопия квантового выхода фотоэмиссии позволяет надежно определить электронное сродство  $\chi^*$  и вероятности выхода электронов в вакуум  $P_{h,t}$  только для области ПЭС благодаря различию спектральных порогов прямой фотоэмиссии и РЕТЕ. В области ОЭС из-за совпадения этих порогов определить величину  $\chi^*$  из спектров напрямую невозможно, поэтому в работах [10–12] она определялась косвенно, по отношению  $P_t/P_h$ . Это осложняло достоверное разделение вкладов изменений сродства и вероятностей выхода в эволюцию квантового выхода фотоэмиссии. Определить величину отрицательного сродства напрямую можно с помощью измерения энергетических распределений эмитированных электронов [15,16]. По ширине энергораспределения можно определить электронное сродство, а по его амплитуде — вероятность выхода электронов. Кроме того, измерение энергораспределений является более „дифференциальной“ методикой и позволяет изучать вероятности выхода эмитируемых электронов в зависимости от их энергии, в то время как при описании спектров квантового выхода фотоэмиссии использовались параметры  $P_h$  и  $P_t$ , усредненные по функциям распределения горячих и термализованных электронов.

В данной работе с помощью измерения энергетических распределений изучено влияние адсорбции избыточного цезия на поверхности  $p$ -GaAs(Cs, O) с ОЭС на вероятность выхода электронов. Установлено, что при адсорбции избыточного цезия эволюция энергораспределений обусловлена как увеличением работы выхода поверхности, так и значительным снижением вероятности выхода электронов в вакуум. Обсуждаются возможные микроскопические причины цезий-индуцированного снижения вероятности выхода.

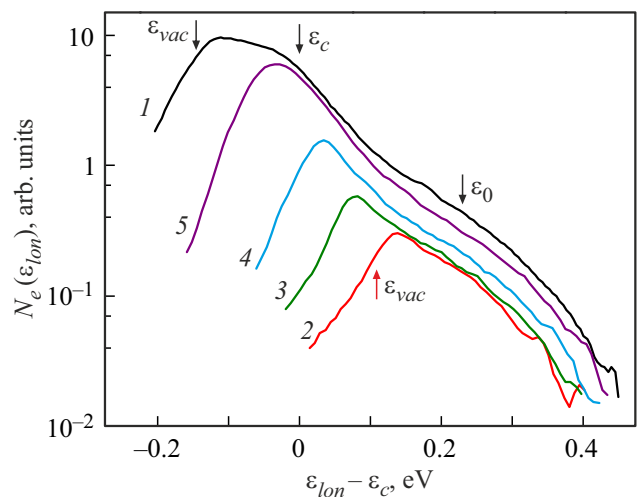
## 2. Методика эксперимента

Эксперименты проводились на слоях сильно легированного  $p$ -GaAs(001) с концентрацией дырок

$\sim 6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , выращенных методом эпитаксии из металлоорганических соединений. Атомарно-чистые поверхности изготавливались с помощью удаления оксидов в растворе HCl в изопропиловом спирте в атмосфере сухого азота с последующим переносом в сверхвысоковакуумную установку без контакта с воздухом и прогревом в вакууме [17]. Эксперимент проводился в установке с отдельными позициями для нанесения цезия и для измерения распределений эмитированных электронов по продольной компоненте кинетической энергии  $N_e(\epsilon_{lon})$ . Поверхность образца освещалась лазером с энергией фотонов  $\hbar\omega = 1.9 \text{ эВ}$  (длина волны 650 нм), превышающей ширину запрещенной зоны GaAs 1.42 эВ. Перед измерением энергораспределений атомарно-чистая поверхность  $p$ -GaAs активировалась до состояния с ОЭС совместным нанесением цезия и кислорода по методике [15] до значений квантового выхода фотоэмиссии  $\sim 25\%$ . Распределения  $N_e(\epsilon_{lon})$  измерялись методом задерживающего потенциала с помощью молибденового сеточного анода, расположенного на расстоянии  $\sim 1 \text{ мм}$  перед образцом. Подробности методики активирования и измерения энергораспределений приведены в работе [15].

## 3. Результаты

Для изучения влияния избыточного цезия на вероятность выхода электронов из  $p$ -GaAs(Cs, O) был проведен эксперимент по измерению распределений эмитированных электронов по продольной компоненте энергии

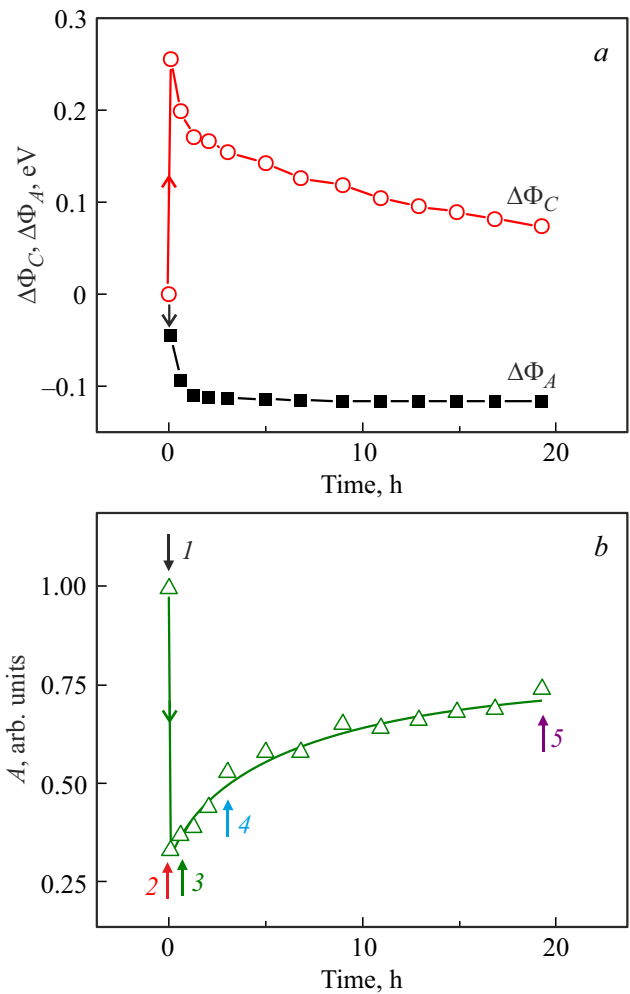


**Рис. 1.** Распределения эмитированных электронов по продольной компоненте энергии  $\epsilon_{lon}$  в эксперименте по переходу поверхности  $p$ -GaAs(Cs, O) от ОЭС к ПЭС путем нанесения избыточного цезия. Кривая 1 измерена до нанесения цезия, кривые 2–5 — после нанесения цезия, в процессе релаксации адсорбционного слоя. Стрелки указывают положение уровня вакуума  $\epsilon_{vac}$  (для кривых 1 и 2), дна зоны проводимости в объеме  $\epsilon_c$  и начальную энергию фотоэлектронов  $\epsilon_0$ . (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

$N_e(\varepsilon_{lon})$  при цезий-индуцированном переходе от ОЭС к ПЭС. В начале эксперимента атомарно-чистая поверхность  $p$ -GaAs активировалась до состояния с ОЭС, затем на поверхность наносился избыточный цезий; результаты показаны на рис. 1. Энергораспределения  $N_e(\varepsilon_{lon})$  измерялись на поверхности в состоянии с ОЭС (кривая 1) и после нанесения избыточного цезия, в процессе релаксации поверхности (кривые 2–5); во время нанесения цезия энергораспределения не измерялись. Энергия электронов на рис. 1 отсчитывается от дна зоны проводимости  $\varepsilon_c$  в квазинейтральном объеме GaAs, положение которого было найдено из начального распределения  $N_e(\varepsilon_{lon})$  (кривая 1). Величина  $\varepsilon_c$  и уровень вакуума  $\varepsilon_{vac}$  определялись по положению характерных точек в распределениях  $N_e(\varepsilon_{lon})$ , в которых производная  $dN_e/d\varepsilon_{lon}$  принимает экстремальные значения [18]. В ходе измерений наблюдалось также изменение работы выхода анода, которое приводило к сдвигу особенности  $\varepsilon_0$  в виде слабого плеча в распределениях  $N_e(\varepsilon_{lon})$ , связанной с начальной энергией фотоэлектронов в зоне проводимости GaAs [19]. Сдвиг особенности  $\varepsilon_0$  определялся совмещением различных кривых  $N_e(\varepsilon_{lon})$ ; на рис. 1 этот сдвиг учтен. Амплитуда высокоэнергетической части энергораспределений  $A$  определялась в диапазоне энергий  $\varepsilon_{lon} - \varepsilon_c = 0.2 - 0.3$  эВ как среднее отношение  $N_e/N_{e(1)}$ , где  $N_{e(1)}$  — начальное энергораспределение до нанесения избыточного цезия (кривая 1). Предполагается, что амплитуда энергораспределения  $A$  пропорциональна вероятности выхода горячих электронов  $P_h$ .

На рис. 2 показано изменение работы выхода поверхности  $p$ -GaAs(Cs, O)  $\Delta\Phi_C$ , работы выхода анода  $\Delta\Phi_A$  и амплитуды энергораспределений  $A$  в эксперименте по нанесению избыточного цезия. Из сравнения кривых 1 и 2 на рис. 1 видно, что нанесение цезия привело к уменьшению ширины распределения  $N_e(\varepsilon_{lon})$ , что отражает увеличение работы выхода поверхности  $p$ -GaAs(Cs, O) и переход к состоянию с ПЭС. При этом амплитуда энергораспределений  $A$  снизилась в несколько раз, что свидетельствует о цезий-индуцированном снижении вероятности выхода электронов. В процессе релаксации поверхности (кривые 2–5 на рис. 1) работа выхода  $\Phi_C$  и амплитуда энергораспределений  $A$  изменялись в сторону исходных значений:  $\Phi_C$  уменьшалась,  $A$  увеличивалась. При этом на рис. 2 выделяется начальный участок наиболее быстрых изменений  $\Phi_C$  и  $A$ , в ходе которых происходило также снижение работы выхода анода  $\Phi_A$ . Разумно предположить, что этот участок связан с частичной десорбцией цезия с поверхности  $p$ -GaAs(Cs, O) и его пересадением на поверхность анода. В дальнейшем, как видно из рис. 2, изменения  $\Phi_A$  прекратились, а более медленные релаксационные изменения  $\Phi_C$  и  $A$  продолжились из-за структурных перестроек в адсорбционном слое на поверхности  $p$ -GaAs(Cs, O) [10].

Для сравнения влияния адсорбции цезия и кислорода на вероятность выхода электронов был проведен эксперимент по измерению энергораспределений  $N_e(\varepsilon_{lon})$



**Рис. 2.** Изменение работы выхода поверхности  $p$ -GaAs(Cs, O)  $\Delta\Phi_C$  (кружки) и металлического анода  $\Delta\Phi_A$  (квадратики) (a), а также амплитуды энергораспределений  $A$  (b) в эксперименте по Cs-индуцированному переходу от ОЭС к ПЭС. Начальная точка измерена на поверхности с ОЭС до нанесения избыточного Cs, остальные точки — в процессе релаксации поверхности после нанесения Cs. Стрелками указаны точки, соответствующие энергораспределениям 1–5 на рис. 1.

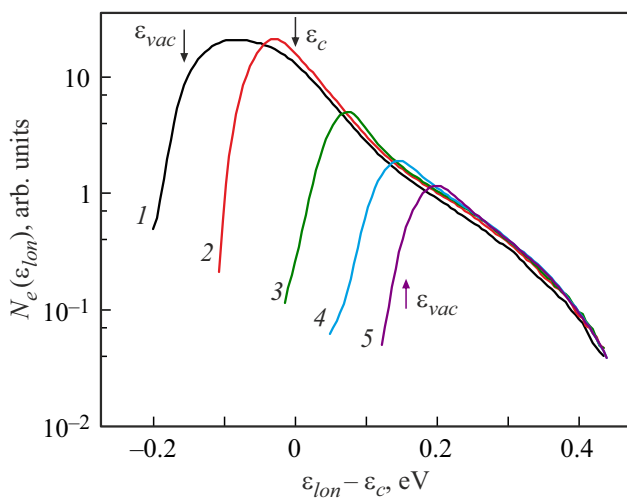
при экспозиции поверхности  $p$ -GaAs(Cs, O) с ОЭС в избыточном кислороде. В отличие от эксперимента с избыточным цезием, в этом эксперименте образец все время находился в позиции для измерения энергораспределений, что позволило изучить эволюцию этих распределений непосредственно в процессе воздействия кислорода. Результаты измерения распределений  $N_e(\varepsilon_{lon})$  представлены на рис. 3, а на рис. 4 показаны изменения работы выхода  $\Delta\Phi_C$  и амплитуды энергораспределений  $A$  в зависимости от дозы кислорода. Работа выхода анода  $\Phi_A$  в этом эксперименте была постоянной с точностью 5 мэВ. Из рис. 3 и 4 видно, что влияние кислорода сводилось в основном к уменьшению ширины энергораспределений и увеличению работы выхода  $\Phi_C$ , а амплитуда энергораспределений  $A$  изменялась слабо,

что согласуется с результатами работы [16]. В отличие от цезиевого эксперимента, амплитуда энергораспределений  $A$  не уменьшилась, а даже немного (на  $\sim 20\%$ ) увеличилась, что свидетельствует об увеличении вероятности выхода электронов в вакуум.

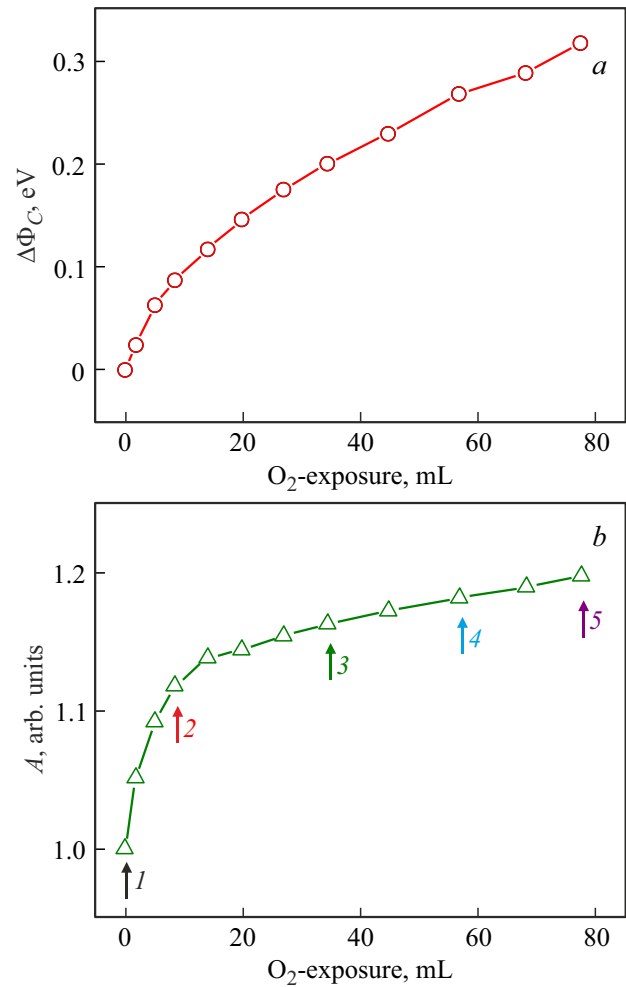
#### 4. Обсуждение

Полученные результаты свидетельствуют о том, что переход от ОЭС к ПЭС на поверхности  $p$ -GaAs(Cs, O) происходит существенно разным образом при нанесении избыточного цезия и кислорода. Адсорбция избыточного кислорода приводит в основном к увеличению работы выхода поверхности; при этом вероятность выхода электронов меняется слабо. Напротив, избыточный цезий не только увеличивает работу выхода, но и существенно снижает вероятность выхода электронов в вакуум. Это согласуется с результатами работ [10–12], полученными методом спектроскопии квантового выхода фотоэмиссии. В данной работе эффект цезий-индуцированного снижения вероятности выхода подтвержден методом измерения энергораспределений эмитированных электронов, в котором изменения работы выхода в области ОЭС определялись напрямую, по ширине энергораспределений. Кроме того, измерения энергораспределений дополняют ранее полученные результаты, благодаря возможности получить информацию о зависимости вероятности выхода эмитированных электронов от их энергии.

Для света с энергией фотонов  $1.9\text{ эВ}$  высокоэнергетический хвост распределений  $N_e(\varepsilon_{lon})$  определяется прямой фотоэмиссией, поэтому амплитуда энергораспределений  $A$  соответствует вероятности выхода горячих электронов. Как видно из рис. 1, при нанесении цезия форма кривых  $N_e(\varepsilon_{lon})$  в области больших энергий



**Рис. 3.** Распределения эмитированных электронов по продольной компоненте энергии  $\varepsilon_{lon}$  в эксперименте по кислород-индуцированному переходу поверхности  $p$ -GaAs(Cs, O) от ОЭС к ПЭС. Кривая 1 измерена до нанесения кислорода, кривые 2–5 — в процессе нанесения кислорода.



**Рис. 4.** Изменение работы выхода поверхности  $p$ -GaAs(Cs, O)  $\Delta\Phi_C$  (a), а также амплитуды энергораспределений  $A$  (b) в зависимости от дозы избыточного кислорода (в миллилитрах, mL) в эксперименте по переходу от ОЭС к ПЭС. Стрелками указаны точки, соответствующие энергораспределениям 1–5 на рис. 3.

$\varepsilon_{lon} > \varepsilon_{vac}$  практически не менялась. Следовательно, эффект цезий-индуцированного снижения вероятности выхода  $P_h(\varepsilon_{lon})$  слабо зависит от энергии, и это согласуется с использованием при описании спектров фотоэмиссии коэффициента  $P_h$ , независящего от энергии и имеющего смысл вероятности выхода, усредненной по функции распределения горячих электронов [10–12]. В то же время, как видно из рис. 3, при нанесении избыточного кислорода увеличение амплитуды распределений  $N_e(\varepsilon_{lon})$  более выражено для энергий электронов, близких к уровню вакуума, что может указывать на наличие энергетической зависимости кислород-индуцированного увеличения вероятности выхода.

Вероятной причиной снижения вероятности выхода при нанесении избыточного цезия на поверхность  $p$ -GaAs(Cs, O) является отражение или рассеяние эмитируемых электронов на двумерных „металлических“

кластерах цезия, образование которых наблюдалось ранее на поверхности Cs/GaAs [20,21]. Увеличение вероятности выхода в процессе релаксации цезиевого покрытия, а также при адсорбции кислорода может объясняться разрушением цезиевых кластеров. Образование двумерных кластеров цезия наблюдалось методом сканирующей туннельной микроскопии на поверхности Cs/GaAs(110) [20]. Адсорбция цезия на этой поверхности приводила также к появлению пиков в спектрах характеристических потерь энергий электронов, обусловленных возбуждением локальных плазмонов в Cs-кластерах [21]. Аналогичные плазмонные пики наблюдались при адсорбции цезия на поверхностях GaAs с различными кристаллографическими ориентациями и сверхструктурными реконструкциями, что свидетельствует об универсальности картины формирования Cs-кластеров с металлическим спектром электронных возбуждений [22]. Экспозиция поверхности Cs/GaAs(110) в кислороде приводила к исчезновению плазмонных реплик фотоэмиссионных линий [23], что связано, вероятно, с распадом металлических цезиевых кластеров. Наблюдавшиеся в работе [24] обратимые вариации поверхностной фотодс и интенсивности фотолюминесценции при поочередном нанесении цезия и кислорода на поверхность сильно легированного  $p^+$ -GaAs(001) также могут быть объяснены формированием и распадом металлических кластеров цезия. Микроскопические механизмы влияния цезиевых кластеров на вероятность выхода электронов в вакуум неясны. Возможные механизмы могут заключаться в увеличении коэффициента отражения электронов от адсорбированного слоя цезия, а также в диффузном рассеянии на коллективных (плазмонных) или одночастичных возбуждениях электронного газа в цезиевых кластерах. Размытие картины дифракции медленных электронов на поверхности Cs/GaAs(001) с большими цезиевыми покрытиями  $\theta > 0.5$  МС [25], а также эффект снижения интенсивности фотолюминесценции [24] свидетельствуют в пользу гипотезы о диффузном рассеянии электронов на цезиевых кластерах.

## 5. Заключение

На поверхности  $p$ -GaAs(Cs, O) с отрицательным эффективным электронным средством измерена эволюция энергетических распределений эмитированных электронов при переходе от отрицательного к положительному средству при нанесении избыточного цезия и кислорода. Установлено, что цезий-индуцированный переход от ОЭС к ПЭС сопровождается как увеличением работы выхода поверхности, так и существенным снижением вероятности выхода электронов в вакуум. Напротив, при аналогичном переходе, вызванном экспозицией в избыточном кислороде, вероятность выхода остаётся практически неизменной. Предположительная причина влияния цезия на вероятность выхода заключается в

отражении или рассеянии электронов на двумерных цезиевых кластерах.

## Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-30003, <https://rscf.ru/project/23-72-30003/>.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] A. Damascelli. Phys. Scr., **109**, 61 (2004).
- [2] V.N. Strocov, L.L. Lev, F. Alarab, P. Constantinou, X. Wang, T. Schmitt, T.J.Z. Stock, L. Nicolaï, J. Očenášek, J. Minár. Nature Commun., **14**, 4827 (2023).
- [3] Р.Л. Белл. *Эмиттеры с отрицательным электронным средством* (М., Энергия, 1978).
- [4] V.V. Bakin, A.A. Pakhnevich, A.G. Zhuravlev, A.N. Shornikov, I.O. Akhundov, O.E. Tereshchenko, V.L. Alperovich, H.E. Scheibler, A.S. Terekhov. e-J. Surf. Sci. Nanotech., **5**, 80 (2007).
- [5] Д.А. Орлов, В.Э. Андреев, А.С. Терехов. Письма ЖЭТФ, **71** (4), 220 (2000).
- [6] O.E. Tereshchenko, V.A. Golyashov, A.A. Rodionov, I.B. Chistokhin, N.V. Kislykh, A.V. Mironov, V.V. Aksenov. Sci. Rep., **7**, 16154 (2017).
- [7] J.W. Schwede, I. Bargatin, D.C. Riley, B.E. Hardin, S.J. Rosenthal, Y. Sun, F. Schmitt, P. Pianetta, R.T. Howe, Z.-X. Shen, N.A. Melosh. Nat. Mater., **9**, 762 (2010).
- [8] J.W. Schwede, T. Sarmiento, V.K. Narasimhan, S.J. Rosenthal, D.C. Riley, F. Schmitt, I. Bargatin, K. Sahasrabudhe, R.T. Howe, J.S. Harris, N.A. Melosh, Z.-X. Shen. Nat. Commun., **4**, 1576 (2013).
- [9] A.G. Zhuravlev, A.S. Romanov, V.L. Alperovich. Appl. Phys. Lett., **105**, 251602 (2014).
- [10] A.G. Zhuravlev, V.L. Alperovich. Appl. Surf. Sci., **461**, 10 (2018).
- [11] А.Г. Журавлев, В.С. Хорошилов, В.Л. Альперович. Письма ЖЭТФ, **105** (10), 686 (2017).
- [12] A.G. Zhuravlev, V.S. Khoroshilov, V.L. Alperovich. Appl. Surf. Sci., **483**, 895 (2019).
- [13] M.G. Burt, J.C. Inkson. J. Phys. D: Appl. Phys., **9**(1), 43 (1976).
- [14] В.Л. Коротких, А.Л. Мусатов, В.Д. Шадрин. Письма ЖЭТФ, **27** (11), 652 (1978).
- [15] V.V. Bakin, K.V. Toropetsky, H.E. Scheibler, A.S. Terekhov, L.B. Jones, B.L. Militsyn, T.C.Q. Noakes. Appl. Phys. Lett., **106**, 183501 (2015).
- [16] L.B. Jones, H.E. Scheibler, S.N. Kosolobov, A.S. Terekhov, B.L. Militsyn, T.C.Q. Noakes. J. Phys. D: Appl. Phys., **54**, 205301 (2021).
- [17] V.L. Alperovich, O.E. Tereshchenko, N.S. Rudaya, D.V. Sheglov, A.V. Latyshev, A.S. Terekhov. Appl. Surf. Sci., **235**, 249 (2004).
- [18] А.С. Терехов, Д.А. Орлов. Письма ЖЭТФ, **59**, 827 (1994).
- [19] H.-J. Drouhin, C. Hermann, G. Lampel. Phys. Rev. B, **31** (6), 3859 (1985).

- [20] L.J. Whitman, J.A. Stroscio, R.A. Dragoset, R.J. Celotta. Phys. Rev. Lett., **66**, 1338 (1991).
- [21] U. Del Pennino, R. Compan., B. Salvarani, C. Mariani. Surf. Sci., **409** (2), 258 (1998).
- [22] V.L. Alperovich, O.E. Tereshchenko, A.N. Litvinov, A.S. Terkhov. Appl. Surf. Sci., **175**, 175 (2001).
- [23] C. Laubschat, M. Prietsch, M. Domke, E. Weschke, E. Remmers, T. Mandel, E. Ortega, G. Kaindl. Phys. Rev. Lett., **62**, 1306 (1989).
- [24] В.С. Хорошилов, Д.М. Казанцев, С.А. Рожков, В.Л. Альперович. Письма ЖТФ, **49** (21), 24 (2023).
- [25] О.Е. Терещенко, В.Л. Альперович, А.С. Терехов. Письма ЖЭТФ, **79** (3), 163 (2004).

Редактор А.Н. Смирнов

### Photoelectron transfer through $p$ -GaAs(Cs, O) – vacuum interface with positive and negative electron affinity

V.S. Khoroshilov<sup>1,2</sup>, H.E. Scheibler<sup>1,2</sup>,  
D.M. Kazantsev<sup>1,2</sup>, S.A. Rozhkov<sup>1,2</sup>, V.L. Alperovich<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Rzhanov Institute of Semiconductor Physics,  
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,  
630090 Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Novosibirsk State University,  
630090 Novosibirsk, Russia

**Abstract** The evolution of the energy distributions of electrons emitted from  $p$ -GaAs(Cs, O) during the transition from negative to positive effective electron affinity upon the deposition of excess cesium has been studied. It was found that during the deposition of excess cesium the evolution of energy distributions is caused not only by the increase in surface work function, but also by the decrease in the probability of electron escape into vacuum. The results are compared with the experiment on excess oxygen adsorption. Presumably, the changes in the escape probability are caused by electron scattering on two-dimensional cesium clusters with metallic excitation spectrum.