

**ЛАБОРАТОРНАЯ
ТЕХНИКА**

УДК 53.089.6, 620.186

**КАЛИБРОВКА СКАНИРУЮЩЕГО ЗОНДОВОГО МИКРОСКОПА
КЕЛЬВИНА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЕЙ ФЕРМИ
НАНОКРИСТАЛЛОВ СУЛЬФИДА СВИНЦА**

© 2025 г. Д. А. Онищук^a, А. П. Литвин^b, П. С. Парфенов^{a,*}

^a*Международный научно-образовательный центр физики наноструктур*

Университет ИТМО

Россия, 197101, Санкт-Петербург, Кронверский просп. 49

^b*School of Material Science and Engineering, Jilin University*

People's Republic of China, 130012, Changchun

**e-mail: qrspeter@gmail.com*

Поступила в редакцию 14.02.2025 г.

После доработки 20.04.2025 г.

Принята к публикации 22.04.2025 г.

Калибровку величины работы выхода зондов для сканирующей микроскопии Кельвина, традиционно основанную на использовании высокоориентированного пиролитического графита, предлагается дополнять калибровкой по распространенному материалу – оксиду олова, легированному индием и фтором (ИТО и FTO). Исследование проводится с использованием зондов с платиновым и золотым покрытиями. По результатам калибровки определяются положения уровня Ферми нанокристаллов сульфида свинца с лигандными оболочками 1,2-этандитиола и тетрабутиламмония йодида. Показано, что выбранные оксиды характеризуются стабильной величиной работы выхода, дополнительная калибровка по оксидам помогает надежнее установить абсолютное положение работы выхода зондов, а золотые зонды обеспечивают более стабильный результат. Выбранные оксиды можно использовать и как дополнение к калибровке по пиролитическому графиту, и самостоятельно.

1. ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые нанокристаллы (НК), такие как PbSe, PbTe, CdS, CdSe, тройные НК (AgBiS₂ и AgInS₂) и НК перовскитов, находят широкое применение в оптоэлектронных устройствах, таких как солнечные элементы [1–4], а также светоизлучающие диоды и фотодетекторы. Размерная зависимость позволяет управлять шириной запрещенной зоны, а изменение лигандной оболочки позволяет смещать уровень Ферми и изменять тип проводимости слоя НК [5, 6]. Совокупность этих особенностей, наряду с возможностью наносить НК из раствора, делает их перспективным и технологичным материалом. Уровни энергии могут смещаться не только за счет контролируемых процессов синтеза. Постепенная деградация, окисление и адсорбция на поверхности НК паров воды приводят к существенному изменению электронной структуры НК [7, 8], что означает рассогласованность уровней энергии в многослойной структуре солнечного элемента и может быть причиной падения эффективности преобразования энергии.

Основными характеристиками электронной структуры НК являются ширина и положение запрещенной зоны, а также положение уровня Ферми. Последний является важнейшим параметром в описании работы любого электронного устройства, поскольку по уровню Ферми происходит выравнивание энергетических зон соседних слоев, и так могут образовываться барьеры для зарядов; также он определяет инжекцию зарядов и поэтому играет важную роль в работе электролюминесцентных устройств и устройств фотовольтаики. Потому знание его положения позволяет подбирать структуру с нужными свойствами, обеспечивающими инжекцию, разделение и транспорт заряда. Кроме того, анализ положения уровня Ферми может быть использован для исследования химического изменения поверхности веществ [9].

Для определения положения уровня Ферми чаще всего используется ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия (Ultraviolet Photoelectron Spectroscopy, UPS) [10], однако полученные с помощью UPS данные справедливы только для вакуума, что не соответствует условиям эксплуатации оптоэлектронных устройств на основе НК. Для проведения измерений в условиях окружающего воздуха с высоким пространственным разрешением, что актуально при исследовании устройств на основе нанокристаллов,

часто используется сканирующий микроскоп с зондом Кельвина (Kelvin Probe Force Microscopy, KPFM). Данный метод обеспечивает высокое пространственное разрешение, он также позволяет проводить измерения морфологии и электрического потенциала поверхности с высоким разрешением и широко применяется для анализа полупроводниковых наноструктур [9, 11], перовскитов [12] и биологических поверхностей [13, 14].

2. СКАНИРУЮЩИЙ МИКРОСКОП С ЗОНДОМ КЕЛЬВИНА

Сканирующий микроскоп с зондом Кельвина является разновидностью атомно-силовой микроскопии, он основан на измерении относительной работы выхода между эталонным зондом и образцом (т. е. собственно на методе зонда Кельвина). Он реализуем как в вакууме, так и в условиях окружающего воздуха [11].

Принцип зонда Кельвина, предложенный в 1898 г., следующий: зонд и образец с различными уровнями Ферми приводятся в контакт, что ведет к установлению электростатического равновесия и выравниванию уровней Ферми, при этом происходит смещение уровня вакуума, образовавшуюся разницу называют контактной разностью потенциалов (V_{CPD}):

$$V_{CPD} = \frac{\varphi_{tip} - \varphi_{sample}}{-e},$$

где φ_{sample} и φ_{tip} — это работа выхода образца и зонда, e — заряд электрона. В случае подачи внешнего напряжения смещения на образец его нужно вычесть из получаемого значения потенциала (и, наоборот, прибавить, если смещение подается на зонд).

В 1932 г. Зисман [15] предложил усовершенствование, позволяющее проводить измерение бесконтактно с использованием гетеродинного детектирования, которое меньше подвержено шумам, — он использовал вибрирующую пластину из материала с известной работой выхода, расположенную параллельно образцу. В этом способе ищется компенсирующий потенциал, который сделает переменный ток между двумя металлическими пластинами нулевым. Механические колебания вызывают изменение емкости системы и, таким образом, переменный ток будет обнаружен, если разность потенциалов между двумя металлическими пластинами не равна нулю [16].

В 1991 метод Зисмана был адаптирован для использования с атомно-силовым микроскопом, он получил название сканирующего зондового микроскопа Кельвина [17]. В первоначальном варианте метод был двухпроходным и каждая строка сканировалась дважды. Первое сканирование проходило в полуконтактном режиме, оно позволяло получить профиль поверхности образца. Далее зонд отводился от образца, на него подавалось переменное напряжение, и зонд двигался над поверхностью по траектории, повторяющей форму рельефа, записанного при первом проходе. Во время второго прохода в каждой точке строки определялся потенциал, при котором колебания зонда прекращались [18]. В настоящее время используется и однопроходная реализация метода.

Оба метода, KPFM и UPS, используются для измерения функции выхода материала, теоретически они должны давать одинаковые значения, но они различаются принципом измерения и на практике могут дополнять друг друга. Метод UPS определяет объемные свойства материала, обладает худшим пространственным разрешением, а также ограниченно применим, если исследуемый материал чувствителен к высокоэнергетическому ультрафиолетовому излучению. В то же время контактная разность потенциалов, которая также определяется зацеплением уровня Ферми к поверхностным состояниям адсорбированными молекулами, разорванными химическими связями и окислительными процессами, лучше определяется методом KPFM.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АБСОЛЮТНОГО ПОЛОЖЕНИЯ УРОВНЯ ФЕРМИ

Поскольку данный метод основан на измерении разности между работами выхода зонда и образца, для достоверного определения уровня Ферми образца необходимо точно знать работу выхода зонда. При этом сложность определения абсолютного положения уровня Ферми остается до сих пор одной из главных проблем метода [12]. Для калибровки зонда чаще всего используют высокоориентированный пиролитический графит (Highly Oriented Pyrolytic Graphite, HOPG), который считается эталонным материалом для проведения калибровки работы выхода зондов [9]. Его недостатком является то, что влияние окружающего воздуха обычно приводит к дрейфу значения

работы выхода НОРГ, начинающемуся сразу после очистки поверхности отслаиванием [9, 13, 19]. Поэтому считается, что ориентироваться надо на значение работы выхода, полученное сразу после удаления верхнего слоя. Величина работы выхода НОРГ находится в интервале от 4.5 [20, 21] до 5.0 эВ [22], но наиболее частым в литературе является значение 4.6 эВ.

Проблема в выборе материала калибровочного образца происходит из-за того, что положение уровня Ферми на воздухе в общем случае зависит не только от работы выхода материала, но и от адсорбционных слоев, слоев оксида и температуры образцов [23]. Одной из первых альтернатив, использующихся вместо НОРГ, стало золото. В работе [24] было подтверждено наблюдение, что хорошие результаты достигаются при использовании для сравнения образца, легированного кремния с напыленным слоем золота, поскольку такая структура обеспечивала малое последовательное сопротивление. Также получили развитие работы по сравнению разных металлов, используемых в качестве калибровочного образца. Так, в работе [25] проведено сравнение образцов из четырех металлов (Pt, Ti, Au, и Ta) с использованием зонда, покрытого платиной. Показано, что работа выхода металлов Ti, Au, и Ta находится в довольно узком диапазоне (4.36–4.41 эВ) относительно данных, полученных методом UPS (4.0–4.8 эВ). При этом величина работы выхода в случае золотого образца оказалась зависящей от толщины платинового покрытия зонда, она менялась в диапазоне 1.5 эВ, в то время как по результатам измерений UPS диапазон значений составляет 0.5 эВ. Сравнение разных материалов калибровочного образца проведено и в работе [9], где исследовались Ag, Cu и Al (с использованием PtIr-зонда), там также были получены довольно близкие значения работы выхода, находящиеся в диапазоне 4.81–4.84 эВ, хотя по данным UPS диапазон составляет 4.1–4.7 эВ.

При этом в работах выбор материалов для калибровки ограничивается металлами, которые сложно очищать (особенно, если это напыленный тонкий слой) и значение работы выхода которых на воздухе часто смещено. В то же время существуют и другие материалы с известным значением работы выхода, например, широко применяющиеся в оптоэлектронике оксиды олова, легированного индием и фтором, известные как ITO и FTO. Они обладают высокой механической прочностью, хорошей проводимостью и

могут быть многократно очищены химическим путем. Кроме того, отсутствуют работы, позволяющие сравнить между собой разные зонды.

В настоящей работе проводится сравнение калибровки зондов атомно-силового микроскопа с покрытием из платины (работа выхода 5.65 эВ) и золота (5.1 эВ) с использованием высокоориентированного пиролитического графита (HOPG, 4.6 эВ). Для уточнения работы выхода зондов и проверки результатов калибровки по HOPG проводится дополнительная калибровка по ИТО (Indium Tin Oxide, 4.7 эВ) и FTO (Fluorine-doped Tin Oxide, 4.4 эВ). Для проверки результатов калибровки определяются уровни Ферми для нанокристаллов PbS с лигандами 1,2-этандитиола (1,2-Ethanedithiol, EDT) и тетрабутиламмония йодида (Tetrabutylammonium iodide, TBAI), широко используемыми для создания солнечных элементов на основе НК PbS [2].

4. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

4.1. Материалы

Оксид свинца (PbO), олеиновая кислота (ОА), бис(триметилсилил)сульфан (TMS)₂S, EDT и TBAI приобретены в компании “Sigma-Aldrich”, метанол, ацетон и изопропанол – в “Вектон”, ацетонитрил – в “AppliChem”. Покрытые ИТО и FTO стеклянные подложки приобретены в компании “Ossila”. Проводящие зонды для АСМ с платиновым и золотым покрытиями приобретены в компании “TipsNano” (зонды NSG10/Pt и HA_NC/Au соответственно). Высокоориентированный пиролитический графит ZYH_DS (10×10×2 мм³) приобретен в компании “NT-MDT”.

4.1.1. Оборудование. При подготовке образцов использованы ультразвуковая ванна ODA-MH20 (Одасервис, Россия), плазменный очиститель PE-25 (Plasma Etch, США) и центрифуга CM-50 (ELMI, Латвия). Спектры поглощения и люминесценции получены с помощью спектрометров UV-Probe 3600 (Shimadzu, Япония) и Cary Eclipse (Varian, США) соответственно.

4.1.2. Изготовление образцов. Подложки ИТО и FTO, используемые для калибровки, последовательно очищались в ультразвуковой ванне (40 кГц, 60 Вт) с использованием метанола, ацетона и изопропанола, после чего подвергались плазменной очистке в течение 30 минут (N₂, 1 Торр, 200 Вт, 20–80 кГц).

В работе использованы НК PbS, полученные методом горячей инъекции [26]. По данным оптической спектроскопии (рис. 1а) диаметр НК составляет 3.5 нм. НК PbS дважды отмывались ацетоном с последующим центрифугированием на скорости 6000 об/мин и перерастворением в октане. Перед нанесением раствор с концентрацией 40 мг/мл был отфильтрован шприцевым фильтром с диаметром пор 20 мкм.

Рис. 1. а – Спектр поглощения НК PbS в растворе, **б** – АСМ-топография поверхности пленки с царапиной, проведенной для определения толщины слоя НК PbS...

Для изготовления образцов НК наносились послойно на вращающуюся подложку с последующей заменой лигандов [27]. Стекланные подложки с покрытием ИТО, используемые для нанесения на них НК, очищались аналогично подложкам ИТО и ФТО, раствор НК объемом 30 мкл наносился на подложку при скорости вращения 3000 об./мин, после чего наносился раствор соответствующих лигандов – ТВАИ в метаноле с концентрацией 15 мг/мл или EDT в ацетонитриле с объемной долей 0.1%. Процедура повторялась до достижения толщины слоя около 50 нм (рис. 1в).

4.1.3. Проведение KPFM. Измерения проводились на ACM Solver PRO-M по двухпроходной методике, потенциал величиной 1 В подавался на образец, данные в тексте ниже приведены с учетом коррекции на эту величину. Перед измерением поверхностного потенциала верхний слой HOPG удалялся с помощью клейкой ленты Scotch (3M). Поверхности ИТО и ФТО очищались непосредственно перед измерением. При отсутствии видимого дрейфа величина контактной разности потенциалов определялась по максимуму гистограммы распределения значения потенциала по кадру. При наличии видимого дрейфа он приводится как результат усреднения по строкам. Все измерения проводились на воздухе и при комнатной температуре.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

5.1. Калибровка

При калибровке зондов серии NSG10/Pt по HOPG контактная разность потенциалов V_{CPD} по первым строкам составила 90–100 мВ, она стабилизировалась на значении –300 мВ (рис. 2а). При последующих измерениях значения V_{CPD} сместились

еще ниже. При калибровке по НОРG зондов серии НА_NC/Au контактная разность потенциалов V_{CPD} составила -150 мВ (рис. 2в), при повторном измерении V_{CPD} она сдвигалась к -180 мВ. Если ориентироваться на первые строки, полученные непосредственно после удаления верхнего слоя НОРG, то работа выхода Pt зонда ϕ_{Pt} составит около 4.7 эВ, а работа выхода Au зонда ϕ_{Au} составит примерно 4.45 эВ. Стабильность V_{CPD} в случае Au-зонда говорит о том, что сильный дрейф в первом случае связан с типом зонда, из-за чего работа выхода платины ϕ_{Pt} за время сканирования сместилась с 4.7 до 4.15 эВ.

Рис. 2. Калибровка зондов из Pt (а, б) и Au (в–д)) по НОРG:

Рис. 3. Калибровка зондов из Pt (а, б) и Au (в–д) по ИТО...

Рис. 4. Калибровка зондов из Pt (а, б) и Au (в–д) по FTO...

При калибровке по ИТО с обоими зондами дрейф отсутствовал (рис. 3), что позволило оценить среднее значение работы выхода. Так, для Pt величина работы выхода составила 4.96 эВ, а для Au величина работы выхода составила 4.52 эВ. При калибровке по FTO с Pt-зондом наблюдался дрейф V_{CPD} от 450 до 550 мВ (рис. 4а) и при расчете по первым строкам величина работы выхода составила 4.85 эВ. Для Au дрейф не наблюдался (рис. 4в), и величина работы выхода составила 4.38 эВ (данные сведены в табл. 1).

Таблица 1. Значение измеренной контактной разности потенциала и рассчитанной величины работы выхода материалов зондов (в скобках приведены справочные величины работы выхода материалов)

Параметры	Контактная разность потенциала V_{CPD} , мВ		Работа выхода материала зондов ϕ , эВ	
	Pt (5.65 эВ)	Au (5.1 эВ)	Pt (5.65 эВ)	Au (5.1 эВ)
Подложка	Pt (5.65 эВ)	Au (5.1 эВ)	Pt (5.65 эВ)	Au (5.1 эВ)
НОRG(4.6 эВ)	$-90 \div -450$	$-150 \div -180$	$4.7 \div 4.15$	$4.45 \div 4.4$
ИТО (4.7 эВ)	260	-180	4.96	4.52
FTO (4.4 эВ)	$450 \div 550$	20	$4.85 \div 4.95$	4.38

Исходя из того, что свежеподготовленные образцы, особенно НОРГ, показывают корректные значения, мы предполагаем, что значения работы выхода Pt-зондов находятся в интервале 4.9–5.0 эВ, соответствующем результатам калибровки по FTO и ИТО. Полученное при калибровке по НОРГ значение 4.7 эВ мы объясняем тем, что быстрый дрейф не позволил зарегистрировать начальные значения, которые соответствуют большей величине. Очевидно, что такой вывод сложно было бы сделать в отсутствие данных дополнительной калибровки. Работа выхода Au-зондов находится в диапазоне 4.4–4.5 эВ. Такое отличие уровней обоих материалов от справочных величин согласуется со смещением работы выхода благородных металлов на воздухе к 4.7 эВ [23]. При этом при калибровке по оксидам воспроизводится разность положения работ выхода золота и платины, что не наблюдается при использовании НОРГ.

Отдельное внимание уделим нестабильности результатов при использовании Pt-зондов. Зонды, в отличие от калибровочных образцов, предварительной очистке не подвергались, поэтому мы изначально предполагали, что их состояние не меняется. Но результаты показывают наличие заметного дрейфа при использовании Pt-зонда в двух опытах из трех. Это согласуется с тем, что у зондов на основе платины на воздухе возможны существенные изменения величины работы выхода [9]. Кроме того, в работе [25] наблюдалась значительная зависимость величины работы выхода Pt-зонда в зависимости от толщины слоя платины. Поскольку в процессе работы зонд механически взаимодействует с образцом, постепенно теряя остроту и напыленный слой металла, а также к нему прикрепляются и открепляются загрязнения, можно предполагать и такую причину нестабильности работы выхода.

Таким образом, рекомендуется использование золотых зондов, а проведение дополнительной калибровки по ИТО/FTO оказывается предпочтительнее калибровки исключительно по НОРГ. При этом они могут быть использованы для калибровки и самостоятельно (лучше в паре).

5.2. Исследование НК PbS

При измерении слоя НК дрейф потенциала практически отсутствовал, что позволило определить среднее значение уровня Ферми. Результаты измерения сведены

в табл. 2, также в таблицу добавлены литературные данные для НК PbS близкого диаметра (3.3 нм) и с той же лигандной оболочкой, полученные методом UPS [5]. Примеры исследования слоя НК PbS-EDT приведены на рис. 5, примеры исследования слоя НК PbS-TBAI приведены на рис. 6.

Рис. 5. Определение уровня Ферми пленки PbS-EDT с помощью зондов из Pt (а–в)...

Рис. 6. Определение уровня Ферми пленки PbS-TBAI с помощью зондов из Pt (а–в)...

Таблица 2. Сравнение экспериментальных значений уровня Ферми НК PbS, полученных методами SKPM и UPS [5]

Методы	НК PbS-EDT		НК PbS-TBAI	
	V_{CPD} , мВ	E_F , эВ	V_{CPD} , мВ	E_F , эВ
NSG10/Pt (4.9 эВ)	–90	4.8	420	4.5
HA_NC/Au (4.4 эВ)	–110	4.3	80	4.3
UPS [5]	–	4.35	–	4.7

Из табл. 2 следует, что результаты для разных образцов, полученные с использованием Au-зонда, одинаковы, хотя метод UPS показывает разницу 0.35 эВ [5, 28]. Отсутствие разницы уровней Ферми может быть объяснено влиянием атмосферной влаги или оставшимися лигандами олеиновой кислоты. Результаты, полученные с помощью Pt-зондов, в противовес данным UPS демонстрируют, что уровень Ферми образцов НК PbS-EDT выше уровня Ферми образцов НК PbS-TBAI. Такое различие объяснить куда сложнее, если не учесть нестабильность результатов, которые демонстрировал Pt-зонд при калибровке.

Результаты исследования НК PbS показывают, что для значений уровней Ферми НК PbS с лигандными оболочками EDT и TBAI нет ожидаемой разницы уровней Ферми. Это ведет к снижению эффективности разделения зарядов в солнечных элементах на основе НК PbS. Поэтому измерение положения уровней Ферми необходимо при изготовлении многослойных структур на основе НК, особенно использующихся в

условиях влияния окружающего воздуха. Такое измерение может быть проведено с использованием KPFM.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Калибровка зондов для KPFM с использованием оксида олова, легированного индием и фтором (ITO и FTO), позволяет определить абсолютное положение работы выхода зонда, что может быть применено для уточнения результатов калибровки по HOPG или использоваться самостоятельно. В сравнении с HOPG и металлами эти материалы обладают на воздухе меньшим дрейфом значения работы выхода, широкой доступностью и могут быть использованы многократно. Также в работе показано, что использование золотых зондов предпочтительнее использования платиновых, потому что последние демонстрируют нестабильность величины работы выхода, что может искажать результаты калибровки и измерений. Результаты исследования НК PbS показывают важность применения KPFM для определения положения уровня Ферми устройств на основе нанокристаллов, использующихся в условиях окружающего воздуха.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Центру коллективного пользования “Нанотехнологии” Университета ИТМО. Авторы выражают благодарность инженеру компании NT-MDT С. Леесменту за помощь в настройке микроскопа. Графики получены с использованием библиотеки SciencePlots [29].

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках госзадания № 2019-1080.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Santos-Cruz J., Marasamy L., Manisekaran R., Mayén-Hernández S.A., De Moure-Flores F., Aruna-Devi R. // *Mater& Lett*. 2022. V. 312. P. 131719.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.131719>
2. *Advanced Micro- and Nanomaterials for Photovoltaics*. Elsevier, 2019. P.35.
3. Wang J., Liu J., Yin H., Li S., Kuvondikov V., Ye L. // *Mater. Chem. Front*. 2023. V. 7. P. 4693-4706. <https://doi.org/10.1039/D3QM00334E>
4. Yang B., Cang J., Li Z., Chen J. // *Nanoscale Adv*. 2024. V. 6. P. 1331.
<https://doi.org/10.1039/D3NA01063E>
5. Brown P.R., Kim D., Lunt R.R., Zhao N., Bawendi M.G., Grossman J.C., Bulović V. // *ACS Nano*. 2014. V. 8. P. 5863. <https://doi.org/10.1021/nn500897c>
6. Парфенов П.С., Бухряков Н.В., Онищук Д.А., Бабаев А.А., Соколова А.В., Литвин А.П. // *Физика и техника полупроводников*. 2022. Т. 56. С. 236.
<https://doi.org/10.21883/FTP.2022.02.51968.9734>.
7. Albaladejo-Siguan M., Baird E.C., Becker-Koch D., Li Y., Rogach A.L., Vaynzof Y. // *Adv. Energy Mater*. 2021. V. 11. P. 2003457. <https://doi.org/10.1002/aenm.202003457>
8. Becker-Koch D., Albaladejo-Siguan M., Lami V., Paulus F., Xiang H., Chen Z., Vaynzof Y. // *Sustainable Energy Fuels*. 2020. V. 4. P. 108. <https://doi.org/10.1039/C9SE00602H>.
9. Fernández Garrillo P.A., Grévin B., Chevalier N., Borowik Ł. // *Rev. Sci. Instruments*. 2018. V. 89. P. 043702. <https://doi.org/10.1063/1.5007619>.
10. Miller E.M., Kroupa D.M., Zhang J., Schulz P., Marshall A.R., Kahn A., Lany S., Luther J.M., Beard M.C., Perkins C.L., Van De Lagemaat J. // *ACS Nano*. 2016. V.10. P. 3302.
<https://doi.org/10.1021/acsnano.5b06833>.
11. Kulis P., Butikova J., Polyakov B., Marcins G., Pervenecka J., Pudzs K., Tale I. // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng*. 2012. V. 38. P. 012048. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/38/1/012048>.
12. Lee M., Wang L., Zhang D., Li J., Kim J., Yun J.S., Seidel J. // *Adv. Mater*. 2024. V.36. P. 2407291. <https://doi.org/10.1002/adma.202407291>.
13. Salerno M., Dante S.// *Materials*. 2018. V. 11. P. 951.
<https://doi.org/10.3390/ma11060951>.

14. *Di Franco C., Piscitelli M., Macchia E., Scandurra C., Catacchio M., Torsi L., Scamarcio G.* // J. Mater. Chem. C. 2024. V. 12. P. 73. <https://doi.org/10.1039/D3TC03110A>.
15. *Zisman W.A.* // Rev. Sci. Instruments. 1932. V. 3. № 7. P. 367.
<https://doi.org/10.1063/1.1748947>.
16. Surface Science Tools for Nanomaterials Characterization / Ed.by C.S.S.R. Kumar. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015. P.117.
17. *Nonnenmacher M., O'Boyle M.P., Wickramasinghe H.K.* // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 58. P. 2921. <https://doi.org/10.1063/1.105227>.
18. *Glatzel T., Gysin U., Meyer E.* // Microscopy. 2022. V. 71. P. i165.
<https://doi.org/10.1093/jmicro/dfab040>.
19. *Chang J., Xiao J., Lin Z., Zhu H., Xu Q.-H., Zeng K., Hao Y., Ouyang J.* // J. Mater. Chem. A. 2016. V. 4. P. 17464. <https://doi.org/10.1039/C6TA05350E>.
20. *Glatzel T., Rusu M., Sadewasser S., Lux-Steiner M.C.* // Nanotechnology. 2008. V. 19. P. 145705. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/19/14/145705>.
21. *Liscio A., Palermo V., Müllen K., Samorì P.* // J. Phys. Chem. C. 2008. V. 112. P. 17368. <https://doi.org/10.1021/jp806657k>.
22. *Kim C., Bae C., Ryu K., Lee B., Shin H.* // Solid State Phenomena. 2007. V. 124–126. P. 607. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.124-126.607>
23. *Tani T.* // J. Soc. Photographic Science Technol. Jpn. 2015. V. 78. P. 16.
<https://doi.org/10.11454/photogrst.78.16>
24. Mechatronics / Ed.by R. Jabłoński, T. Březina. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. P.227.
25. *Castanon E.G., Fernández Scarioni A., Schumacher H.W., Spencer S., Perry R., Vicary J.A., Clifford C.A., Corte-León H.* // J. Phys. Commun. 2020. V. 4. P. 095025.
<https://doi.org/10.1088/2399-6528/abb984>
26. *Hines M.A., Scholes G.D.* // Adv. Mater. 2003. V. 15. P. 1844.
<https://doi.org/10.1002/adma.200305395>
27. *Lu K., Wang Y., Liu Z., Han L., Shi G., Fang H., Chen J., Ye X., Chen S., Yang F., Shulga A.G., Wu T., Gu M., Zhou S., Fan J., Loi M.A., Ma W.* // Adv. Mater. 2018. V. 30. P. 1.
<https://doi.org/10.1002/adma.201707572>

28. *Kwon N., Song S.H., Jin J., Kim S., Kim K., Hwang G.W., Yi Y., Oh S.J., Koch N., Kim Y.-H., Hwang D.K., Park S.* // *Appl. Surface Science*. 2024. V. 664. P. 160235.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.160235>
29. *Garrett J.* // *Zenodo*. garrettj403/SciencePlots. 2023.
<https://doi.org/10.5281/ZENODO.4106649>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. **а** – Спектр поглощения НК PbS в растворе, **б** – АСМ-топография поверхности пленки с царапиной, проведенной для определения толщины слоя НК PbS, **в** – типичный профиль поверхности образца с пленкой НК PbS-EDT и царапиной.

Рис. 2. Калибровка зондов из Pt (**а, б**) и Au (**в–д**) по НОРГ: **а** – дрейф CPD со скоростью около 30 мВ/мин при скорости сканирования 4.7 мкм/мин (стрелка указывает направление сканирования); **в** – гистограмма распределения контактной разности потенциала при первом сканировании НОРГ (среднее значение $V_{CPD} = 150$ мВ); **г** – топография поверхности; **б, д** – KFPМ-изображения.

Рис. 3. Калибровка зондов из Pt (**а, б**) и Au (**в–д**) по ИТО: **а** – гистограмма распределения V_{CPD} (среднее значение $V_{CPD} = 260$ мВ); **в** – гистограмма распределения V_{CPD} (среднее значение $V_{CPD} = -180$ мВ); **б** – KFPМ-изображение края ИТО, **г** – топография поверхности, **д** – KFPМ-изображение поверхности ИТО.

Рис. 4. Калибровка зондов из Pt (**а, б**) и Au (**в–д**) по FTO: **а** – дрейф CPD со скоростью около 14 мВ/мин при скорости сканирования 1.2 мкм/мин (стрелка указывает направление сканирования), **в** – гистограмма распределения V_{CPD} (среднее значение $V_{CPD} = -20$ мВ); **б, д** – KFPМ-изображения; **г** – топография поверхности FTO.

Рис. 5. Определение уровня Ферми пленки PbS-EDT с помощью зондов из Pt (**а–в**) и Au (**г–е**): **а** – гистограмма распределения V_{CPD} PbS-EDT ($V_{CPD} \approx -90$ мВ); **г** – гистограмма распределения V_{CPD} PbS-EDT (среднее значение $V_{CPD} \approx -110$ мВ); **б, д** – топографии поверхности; **в, е** – KFPМ-изображения.

Рис. 6. Определение уровня Ферми пленки PbS-TBAI с помощью зондов из Pt (**а–в**) и Au (**г–е**): **а** – гистограмма распределения V_{CPD} PbS-EDT (среднее значение $V_{CPD} \approx 420$ мВ); **г** – гистограмма распределения V_{CPD} PbS-EDT (среднее значение $V_{CPD} \approx 80$ мВ); **б, д** – топографии поверхности; **в, е** – KFPМ-изображения.

на всех рисунках скобки с обеих сторон: (а), (б) и т.д.

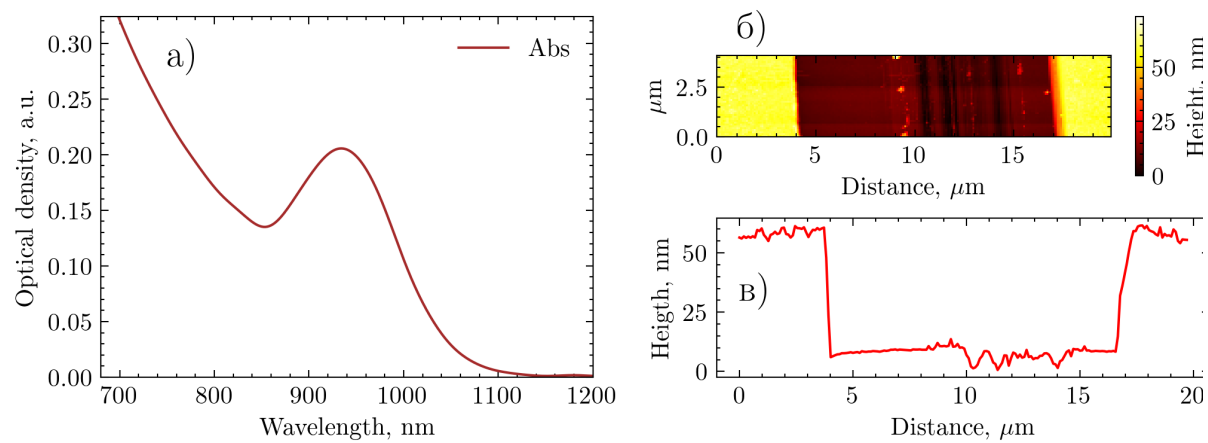


Рис. 1.

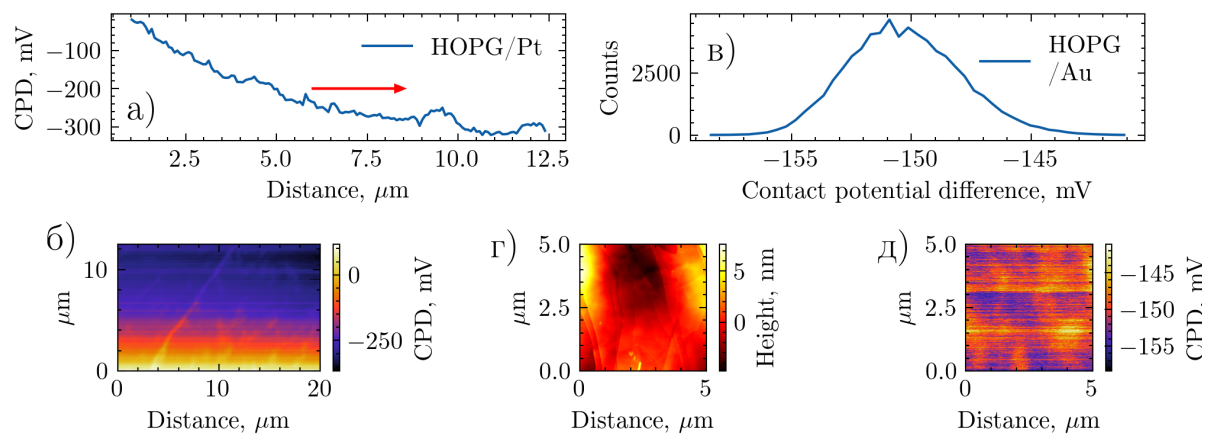


Рис. 2.

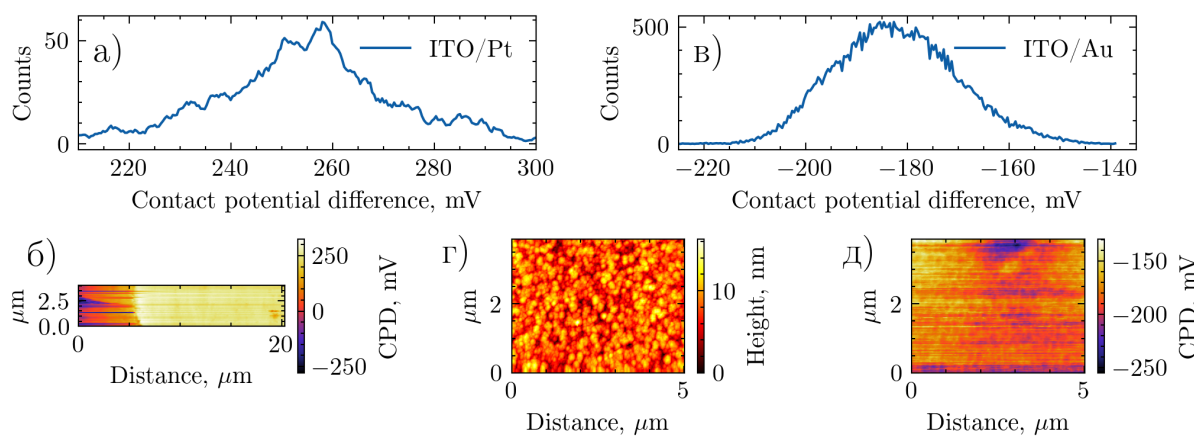


Рис. 3.

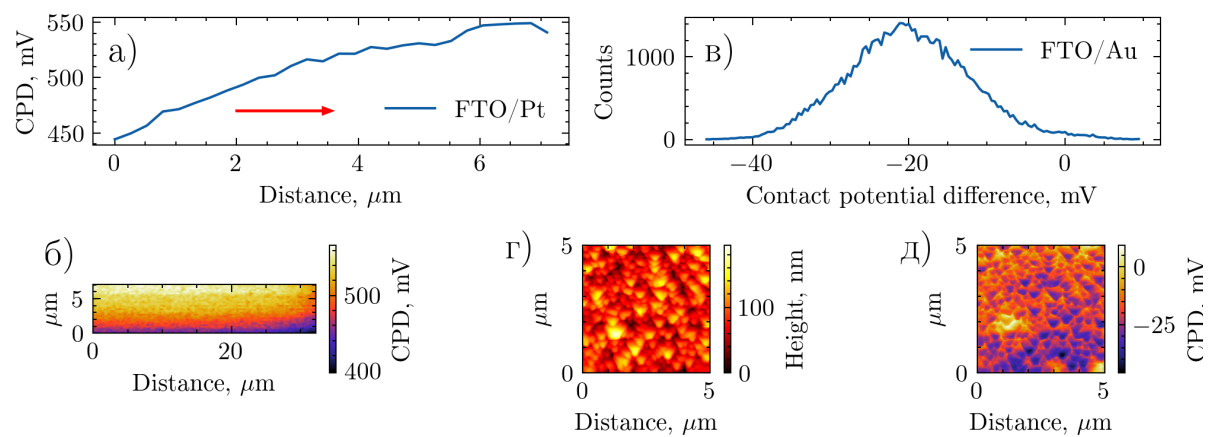


Рис. 4.

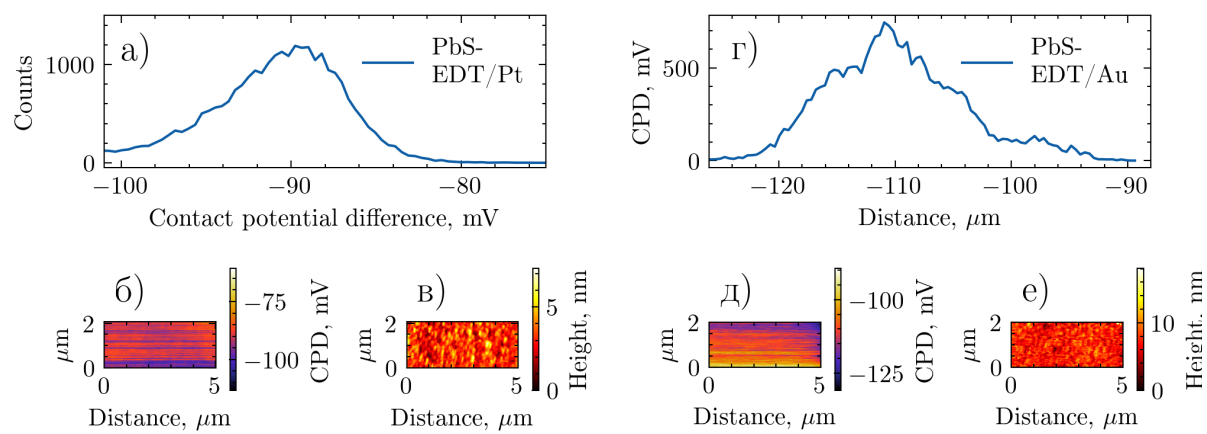


Рис. 5.

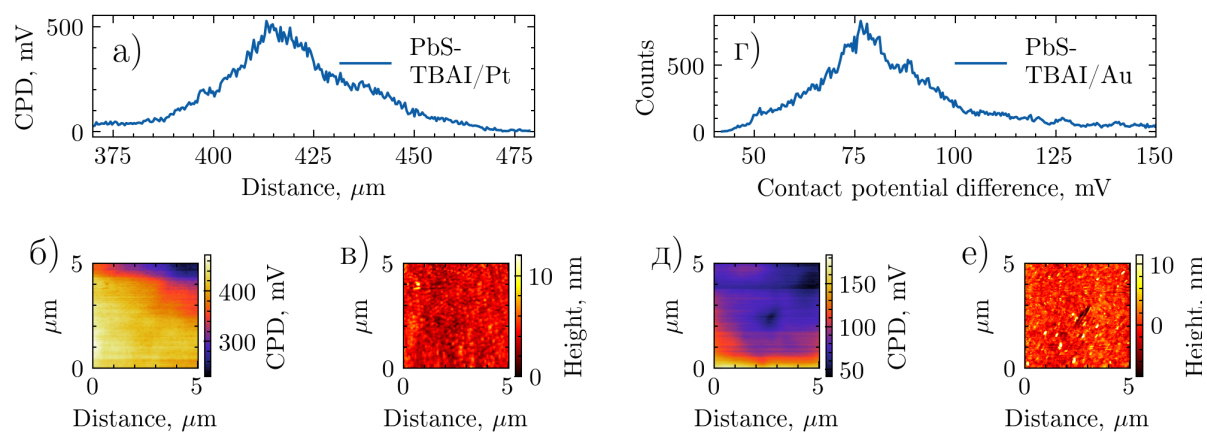


Рис. 6.