

УДК 681.586.5+544.774.4

ДЕТЕКТОРЫ ПЛАМЕНИ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ

© 2023 г. Д. Н. Певцов^{a, b, *}, Д. В. Дёмкин^b, А. В. Кацаба^{b, c}, А. В. Гадомская^a

^a Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук,
проспект ак. Семенова, 1, Черноголовка, Московская область, 142432 Россия

^b Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)”,
Институтский пер., д. 9, Долгопрудный, Московская обл., 141701 Россия

^c Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П.Н. Лебедева
Российской академии наук, Ленинский проспект, д. 53, Москва, 119991 Россия

*E-mail: pevtsov.dn@phystech.edu

Поступила в редакцию 13.02.2023 г.

После доработки 15.03.2023 г.

Принята к публикации 16.03.2023 г.

В работе рассмотрена возможность применения полупроводниковых нанокристаллов в фотодетекторах для оптической регистрации открытого пламени. Проведена конкретизация границ спектральной области чувствительности датчиков пламени. В соответствии с этим синтезированы коллоидные нанокристаллы сульфида свинца, поглощающие в диапазоне 1–1.5 мкм. Из полученных частиц изготовлены фоторезисторы с разным лигандным составом. Для полученных образцов измерены вольт-амперные характеристики и рассчитаны характеристики фоточувствительности и удельной обнаружительной способности. Сделана теоретическая оценка дальности обнаружения пламени для полученных образцов. Показано, что возможно уверенное детектирование фотосигнала на расстоянии более 80 м.

Ключевые слова: оптические датчики пламени, полупроводниковые нанокристаллы, сульфид свинца, фоторезисторы

DOI: 10.31857/S0023119323040101, EDN: QNZEBJ

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время ввиду увеличения числа пожаров все более востребовано раннее обнаружение возгорания в закрытых помещениях [1]. На сегодняшний день наиболее распространенными датчиками возгорания в закрытых помещениях являются температурные и дымовые детекторы пламени. Основной принцип работы этих детекторов заключается в реагировании на последствия взаимодействия пламени с окружающей средой (выделение тепла, дыма и газов) [2]. Несмотря на свою низкую стоимость, данные детекторы обладают конечным временем срабатывания, которое определяется расположением датчика в помещении и масштабом возгорания.

В помещениях, в которых хранятся легковоспламеняющиеся вещества (например, газ, нефтепродукты, химические вещества), критична скорость реакции противопожарной системы на возгорание. Для обеспечения пожарной безопасности в таких помещениях требуется применение детекторов открытого пламени, имеющих малое время

срабатывания. Для этого применяются оптические детекторы на основе полупроводниковых чувствительных элементов. Такие детекторы обладают временем срабатывания менее десяти секунд [2].

Основой конструкции оптических датчиков пламени являются инфракрасные оптические детекторы. Для корректной работы таких детекторов требуется поддержание их низкой рабочей температуры [3]. Поэтому конструкция детекторов пламени на их основе требует массивного корпуса. Сложность проектирования, изготовления и поддержания заявленных характеристик таких датчиков приводит к значимой стоимости конечного продукта. Высокая стоимость и габариты современных оптических детекторов пламени не позволяют использовать их для обеспечения пожарной безопасности бытовых и небольших складских помещений.

Актуальным решением миниатюризации и удешевления оптических детекторов пламени является применение инфракрасных фотодетекторов на основе полупроводниковых коллоидных

нанокристаллов [4, 5]. Такие фотодетекторы работают при комнатной температуре и обладают характеристиками, сравнимыми с охлаждаемыми аналогами.

Полупроводниковые коллоидные нанокристаллы – наночастицы, обладающие зависимостью длинноволнового края поглощения от размера. Это является следствием эффекта размерного квантования электронных уровней полупроводника при размерах частиц сравнимых с боровским радиусом экситона [6, 7].

Коллоидные нанокристаллы получают методом высокотемпературного коллоидного синтеза. Данный метод не подразумевает использование дорогостоящего специального оборудования и требует только доступные химические реактивы [8, 9]. При этом легко реализуема горизонтальная масштабируемость производства коллоидных нанокристаллов.

Создание инфракрасных фотодетекторов на основе коллоидных нанокристаллов требует решения ряда задач, направленных на разработку и оптимизацию методов синтеза коллоидных полупроводниковых нанокристаллов, замены лигандов [10–12] и создания фоточувствительной структуры [13, 14]. Поэтому целью данной работы является демонстрация возможности создания детектора пламени на основе коллоидных полупроводниковых нанокристаллов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез наночастиц

В ходе синтеза использовались следующие вещества и реактивы: хлорид свинца (II) (PbCl_2 , Alfa Aesar, 99.999%), оксид свинца (II) (PbO , Alfa Aesar, 99.99%) сера (СПЕКТР-ХИМ, 99.9%), олеиламин (OLA, Acros, 80–90%, technical grade), 1-децен (Компонент-реактив, 90%), триоктилфосфин (TOP, Acros, 90%), олеиновая кислота (OA, 80–90%, technical grade), н-гексан (Macron, 99%).

Синтез 1

В сосуд Шленка вносились 0.3 ммоль порошка серы, 1 мл OLA и перемешивались в токе аргона при температуре 90°C в течение часа. Далее в трехгорлую колбу вносились 1 ммоль порошка PbO , 1 мл OLA, 3 мл децена и перемешивались при температуре 130°C в токе аргона в течение часа. Далее температура понижалась до 100°C и вносился 1 мл прекурсора серы. Спустя 6 мин добавлялись 0.25 мл TOP. Реакция останавливалась резким охлаждением.

Синтез 2

В сосуд Шленка вносились 0.16 ммоль порошка серы, 1 мл OLA и перемешивались в токе аргона при температуре 90°C в течение часа. Далее в трехгорлую колбу вносились 2.3 ммоль порошка

PbCl_2 , 4 мл OLA и перемешивались при температуре 130°C в токе аргона в течение часа. Далее температура понижалась до 120°C и вносился 1 мл прекурсора серы. Спустя 60 мин реакция останавливалась резким охлаждением, после чего добавлялись 0.5 мл OA и 1.5 мл н-гексана.

Для обеих методик синтеза использовалась следующая постсинтетическая обработка: к 1 мл реакционной смеси добавлялись 2 мл смеси изопропанол : ацетон (в соотношении 1 : 2), после чего раствор центрифугировался при скорости 3000 об./мин в течение 3 мин. После этого надосадочная жидкость сливалась, осадок редицергировался в н-гексане. Процедура повторялась 3 раза, после чего осадок высушивался от остатков растворителя и диспергировался в н-гексане.

Экситонный пик поглощения полученных нанокристаллов лежал в области 1.30–1.45 мкм.

Изготовление электродов

Для отработки методов создания детекторов пламени изготавливались золотые электроды на кремниевой подложке. Для этого использовались окисленные кремниевые пластины диаметром 100 мм (толщина слоя SiO_2 составляла 450 нм). На пластины напыляли хром и золото согласно шаблону; толщина слоев – 10 и 90 нм соответственно. После напыления хрома и золота пластины разрезались на отдельные электроды. Контроль качества изготовления электродов производили оптическими и электрическими методами.

Подготовка электродов производилась следующим образом: сначала они помещались в н-метилпирролидон, нагретый до 80°C, для удаления защитного слоя фоторезиста. Затем электроды промывались в кипящем изопропанол для очистки электродов от остаточных загрязнений.

Изготовление образцов фоторезисторов

Метод 1 (SCN^-). Подготовленный электрод помещается на спин-коатер и раскручивается до скорости 3000 об./мин. На подложку с помощью дозатора впрыскивается 40 мкл раствора НК, после чего спустя 25 с наносится 50 мкл раствора роданида аммония (концентрация 17.5 мг/мл) в ацетонитриле. Через 25 с производится пятикратная промывка 60 мкл ацетонитрила.

Метод 2 (TBAI). Подготовленный электрод помещается на спин-коатер и раскручивается до скорости 3000 об./мин. На подложку с помощью дозатора впрыскивается 40 мкл раствора НК, после чего спустя 25 с наносится 50 мкл раствора йодида тетрабутиламмония (концентрация 25 мг/мл) в ацетонитриле. Через 25 с производится пятикратная промывка 60 мкл ацетонитрила.

Метод 3 (EDT). Подготовленный электрод помещается на спин-коатер и раскручивается до скорости 3000 об/мин. На подложку с помощью дозатора впрыскивается 40 мкл раствора НК, после чего спустя 25 с наносится 50 мкл раствора этан-1,2-дитиола (0.5%) в ацетонитриле. Через 25 с производится пятикратная промывка 60 мкл ацетонитрила.

Метод 4 (S^{2-}). Подготовленный электрод помещается на спин-коатер и раскручивается до скорости 3000 об/мин. На подложку с помощью дозатора впрыскивается 40 мкл раствора НК, после чего спустя 25 с наносится 50 мкл раствора сульфида натрия в формамиде. Через 25 с производится четырехкратная промывка 60 мкл формамида.

Метод 5 (PbI_2). Рабочий раствор готовится согласно методике из работы [15]. Далее подготовленный электрод помещается на спин-коатер и раскручивается до скорости 3000 об/мин. На подложку с помощью дозатора впрыскивается 40 мкл раствора НК.

Измерение электрофизических характеристик

Оценка фотоэлектрических характеристик детекторов пламени на основе НК проводилась по величине сопротивления фоторезисторов при различных уровнях освещенности активной площади детекторов. Измерения вольт-амперных характеристик проводились по следующей методике. Исследуемый образец помещался в специальный держатель, который обеспечивал его позиционирование и электрический контакт подпружиненных позолоченных электродов с образцом. В качестве источника напряжения использовался программируемый блок питания АК ИП 1142/3G. Измерения тока, протекающего через образец, проводилось с помощью преобразователя ток-напряжение и вольтметра АК ИП В7-78/1. Диапазон изменения смещения – 0.0–5.0 В с шагом 0.1 В. Измерения проводились при отсутствии внешней засветки и при плотности мощности падающего монохроматического света, равной 2.5 мВт/см². Для этого использовался лазер с длиной волны 980 нм и мощностью излучения 30 мВт. Для регулировки мощности падающего излучения луч лазера был расфокусирован, а измерения проводились в пятне лазера диаметром 40 мм; площадь активной площадки образца – 0.05 мм².

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Конкретизация границ области инфракрасного спектрального диапазона чувствительности фотодетекторов

Эффективная работа детектора в ИК-диапазоне возможна при правильном выборе рабочего диапазона устройства. На рис. 1 приведен харак-

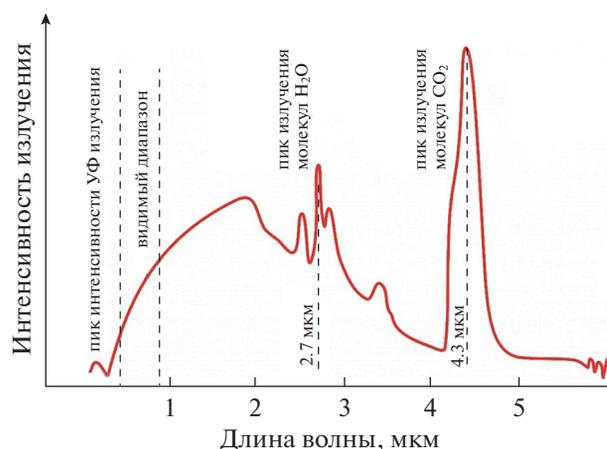


Рис. 1. Спектр излучения пламени при сгорании углеводородов.

терный спектр излучения пламени при сгорании углеводородов. Спектр представляет из себя комбинацию спектра излучения абсолютно черного тела определенной температуры и пиков около 2.7 и 4.3 мкм, которые соответствуют пикам интенсивности излучения молекул H_2O и CO_2 – основным продуктам сгорания большинства органических соединений.

Известно, что спектр излучения абсолютно черного тела, который является частью реального спектра пламени, определяется его температурой. В табл. 1 приведена максимальная (достижимая) температура пламени адиабатического горения основных видов топлива, органических веществ и газов [16]. Адиабатическая температура горения – это расчетная величина, которая не учитывает теплообмен с окружающей средой и используется для моделирования пожаров. Она отражает, до какой температуры нагреваются продукты горения [17].

Адиабатическая температура горения основных видов топлива и органических веществ находится в диапазоне от 1750 до 3000°C. На рис. 2 приведены спектры излучения абсолютно черного тела при данных температурах.

Большинство полупроводниковых оптических датчиков пламени нацелены на рабочий диапазон 4–5 мкм – область с наибольшей интенсивностью излучения молекул CO_2 . Для таких фотодетекторов соотношение сигнал/шум падает с ростом длины волны. Поэтому, датчики, работающие в среднем ИК-диапазоне, обладают низкой чувствительностью и, ввиду малого соотношения сигнал/шум, требуют наличия системы охлаждения в конструкции прибора. Другим недостатком является неспособность детектировать безуглеродные продукты горения, что является критическим, напри-

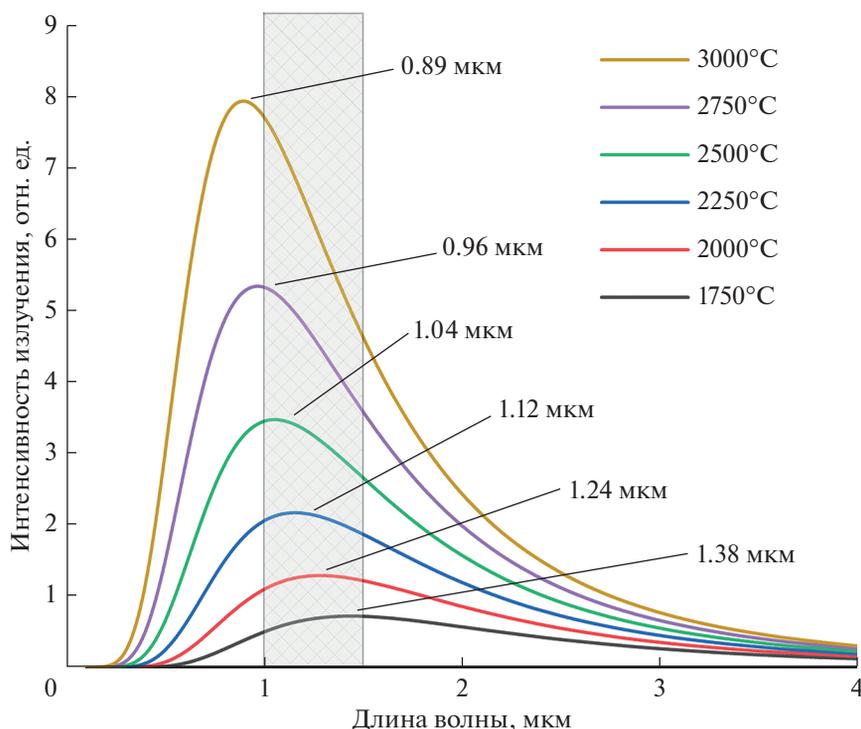


Рис. 2. Спектры излучения абсолютно черного тела при разных температурах. Заштрихованная область — предлагаемый рабочий диапазон.

мер, при производстве ряда азотных и фосфорных удобрений.

Детектирование пламени в области 1.0–1.5 мкм позволяет фиксировать продукты горения любого состава в широком диапазоне температур. Это

возможно за счет детектирования теплового излучения продуктов горения. Стоит отметить, что этот диапазон захватывает область максимальной интенсивности теплового излучения большинства широко используемых видов топлива, растворите-

Таблица 1. Максимальная (достижимая) температура пламени адиабатического горения основных видов топлива, органических веществ и газов. Окислитель — воздух

Вещество	Температура горения, °С	Вещество	Температура горения, °С
Ацетальдегид	2015	Декан	2013
Ацетон	1980	Этан	1971
Ацетилен	2334	Этанол	1965
Бензол	2090	Этилен	2102
Бутан	1975	Гексан	1965
Сероуглерод	1984	Метан	1963
Циклогексан	2323	Метанол	1949
Природный газ	1850	Аммиак	2572
Пентан	1977	Угарный газ	1115
Пропан	1977	Диборан	3077
Толуол	2071	Гидразин	2764
Белый фосфор	2969	Водород	1896
Фосфин	2866	Силан	2770
Бензин	1300	Древесина	1980
Мазут	2102	Антрацит	2180
Керосин	2093	Каменный уголь	2172

Таблица 2. Обозначения образцов и замещающих лигандов

Номер образца	Прекурсор свинца	Замещающий лиганд
1	PbO	SCN ⁻
2	PbCl ₂	SCN ⁻
3	PbO	EDT
4	PbCl ₂	EDT
5	PbO	TBAI
6	PbO	S ²⁻
7	PbO	PbI ₂

лей и газов. Другим преимуществом детекторов, работающих в данном диапазоне, является более высокое соотношение сигнал/шум по сравнению со средним ИК-диапазоном.

Фоточувствительные характеристики

Для анализа фотоэлектрических характеристик детекторов пламени на основе НК было изготовлено 7 контрольных образцов (табл. 2). Образцы 1–6 состояли из 10 слоев НК каждый, образец 7 содержал 5 слоев НК. После изготовления образцы высушивались в вакууме в течение одного часа для удаления остатков растворителя.

На рис. 3 показаны вольт-амперные характеристики полученных образцов. Каждый из изготовленных образцов характеризуется сопротивлениями при отсутствии и наличии освещения. Величины этих сопротивлений варьируются от единиц мегаом до нескольких гигаом, в зависимости от использованного лиганда и прекурсора свинца. Характерные значения токов при смещении в 5 В находятся в диапазоне от единиц наноампер до одного микроампера. Такие величины токов характерны для промышленных резистивных фотоприемников.

По величине темнового сопротивления можно оценить максимальную удельную обнаружитель-

ную способность фоторезистивного детектора по следующей формуле:

$$D^* = \frac{\sqrt{AI}}{Pi_n}, \quad (1)$$

где A – площадь активной площадки образца, P – мощность падающего излучения, I – фототок, протекающий через образец и i_n – спектральная плотность темнового шума тока. Для изготовленных электродов $A = 0.05 \text{ мм}^2$. При напряжении U через фоторезистор протекает фототок, равные разнице токов при наличии засветки и ее отсутствии, $I = U((R - R_d)/RR_d)$, где R_d – темновое сопротивление детектора, а R – сопротивление детектора при освещении. Спектральную плотность темновых шумов можно оценить как

$$i_n = \sqrt{\frac{4kT + 2eU}{R_d}}, \quad (2)$$

где k – постоянная Больцмана (1.38×10^{-23} Дж/К), T – температура детектора (300 К), а e – заряд электрона (1.6×10^{-19} Кл). При этом чувствительность фоторезистора определяется следующим соотношением:

$$S = \frac{I}{P}. \quad (3)$$

Фотоэлектрические характеристики приведены в табл. 3.

При использовании лигандов роданида аммония (SCN⁻, образцы 1 и 2) темновые сопротивления фоторезисторов оказываются одними из наибольших среди всех использованных лигандов. Это приводит к наименьшим значениям спектральной плотности шума фотоприемника. Тем не менее величины удельной обнаружительной способности данных образцов не превышают $2 \times 10^9 \text{ см} \sqrt{\text{Гц/Вт}}$. Это обусловлено их низкой чувствительности ввиду малого отношения темновых и световых сопротивлений. Использование хлоридного прекурсора свинца в синтезе НК при-

Таблица 3. Фотоэлектрические характеристики изготовленных образцов

№	Прекурсор свинца	Замещающий лиганд	R_d , МОм	R , МОм	R_d/R	I , А	i_n , А/√Гц	S , мА/Вт	D^* , см √Гц/Вт	P_0 , Вт	I_0 , м	I_1 , м
1	PbO	SCN ⁻	671	440	1.53	3.91×10^{-9}	4.91×10^{-14}	3.13	1.46×10^9	1.57×10^{-11}	7485	5.24
2	PbCl ₂	SCN ⁻	211	152	1.39	9.20×10^{-9}	8.75×10^{-14}	7.36	1.92×10^9	1.20×10^{-11}	8594	8.04
3	PbO	EDT	16.80	7.2	2.33	3.97×10^{-7}	3.10×10^{-13}	317	2.34×10^{10}	9.77×10^{-13}	29987	52.81
4	PbCl ₂	EDT	115	47	2.45	6.29×10^{-8}	1.19×10^{-13}	50.32	9.72×10^9	2.36×10^{-12}	19312	21.02
5	PbO	TBAI	2.93	1.75	1.67	1.15×10^{-6}	7.43×10^{-13}	920	2.84×10^{10}	8.07×10^{-13}	32999	89.93
6	PbO	S ²⁻	0.861	0.746	1.15	8.95×10^{-7}	1.37×10^{-12}	716	1.20×10^{10}	1.91×10^{-12}	21430	79.32
7	PbO	PbI ₂	1400	248	5.65	1.66×10^{-8}	3.40×10^{-14}	13.27	8.94×10^9	2.56×10^{-12}	18525	10.79

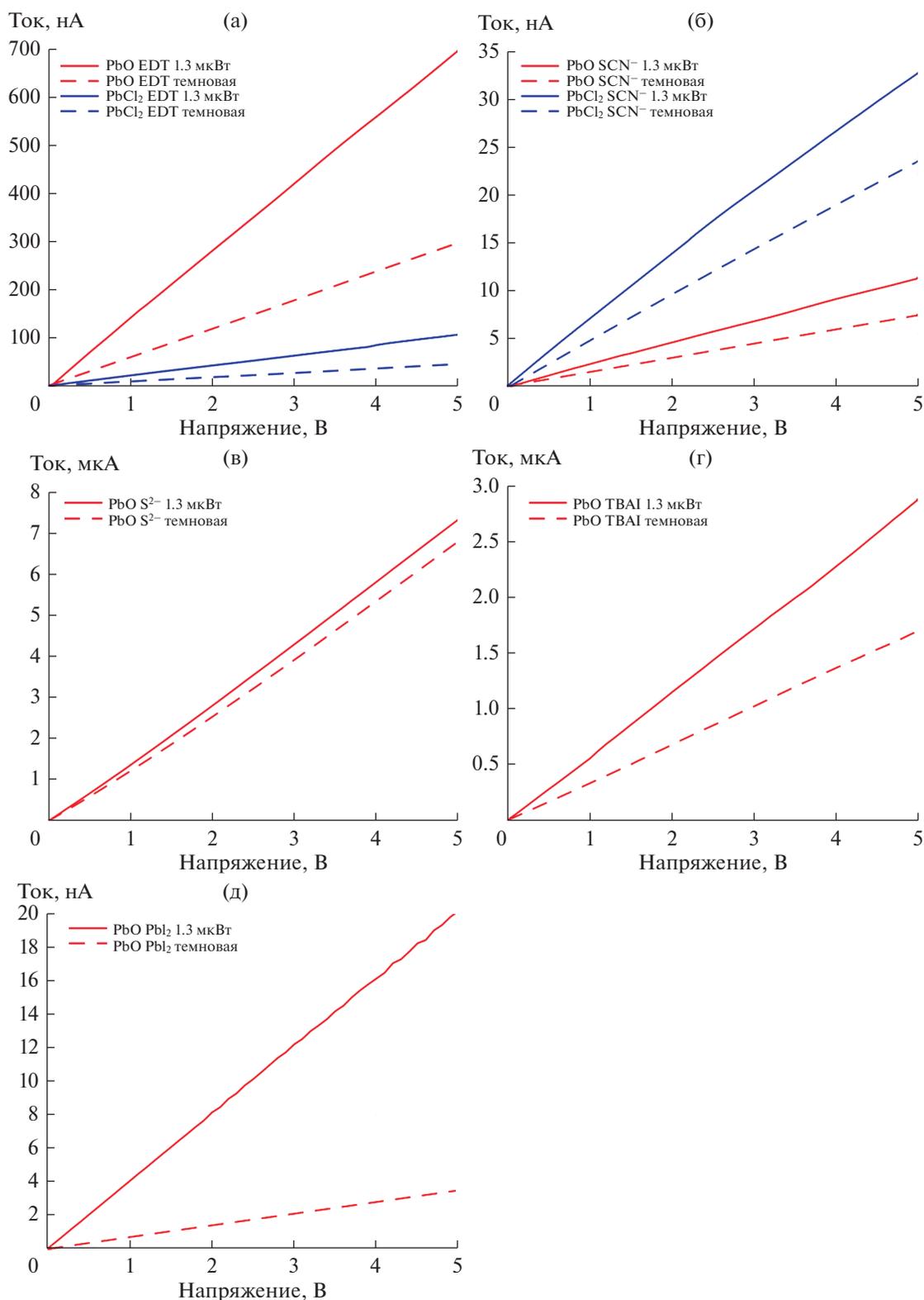


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики фоторезисторов на основе НК PbS с заменой лигандов на (а) SCN⁻, (б) EDT, (в) TBAI, (г) S²⁻ и (д) I₂. Сплошные линии – световые характеристики, штриховые линии – темновые характеристики. Красные линии – нанокристаллы с оксидом свинца в качестве прекурсора, синие линии – нанокристаллы с хлоридом свинца в качестве прекурсора.

водит к значительному увеличению фототока. При этом значение удельной обнаружительной способности для разных методов синтеза незначительное для данного лиганда.

Одним из наиболее используемых лигандов, применяемых для изготовления проводящих слоев НК, является этандитиол. Его использование обусловлено тем, что его молекулы обеспечивают сшивку соседних наночастиц между собой за счет наличия двух функциональных групп. Это должно приводить к более высоким проводимостям слоев НК, по сравнению с другими лигандами. Действительно, по сравнению с роданид-анионом токи для образцов с данным лигандом (образцы 3 и 4) выше на 1–2 порядка. При этом отношение темновых и световых сопротивлений для этих образцов заметно выше. Это приводит к тому, что чувствительность образца 3 достигает 0.32 А/Вт, а значение удельной обнаружительной способности достигает 2.34×10^{10} см $\sqrt{\text{Гц/Вт}}$, что на порядок выше, чем D^* образцов 1 и 2. Заметим, что роданид аммония, в отличие от этандитиола, показал себя оптимальным лигандом для фоторезисторов на основе НК HgSe [10].

В отличие от образцов 1 и 2, влияние выбора прекурсора свинца на фоточувствительные характеристики образцов 3 и 4 более ярко выражена. Так, чувствительность образца 3 выше таковой образца 4 более чем в шесть раз, а значение D^* более чем в два раза. Это противоположно результатам для образцов 1 и 2, где большая чувствительность наблюдалась для прекурсора хлорида свинца. Это показывает, что выбор прекурсора свинца оказывает разное влияние на фоточувствительные характеристики для различных лигандов.

Образец, полученный из хлоридного прекурсора свинца и замещающего лиганда ТВАІ, продемонстрировал отсутствие проводимости. Это, по всей видимости, обусловлено неэффективной методикой замены лигандов при использовании данного прекурсора свинца. Образец 5 продемонстрировал наибольшее значение фототока (1.15 мкА) при отношении темнового к световому сопротивлению, сравнимым с отношением для образцов 1 и 2. Это приводит к максимальному значению чувствительности (0.92 А/Вт) и удельной обнаружительной способности (2.84×10^{10} см $\sqrt{\text{Гц/Вт}}$).

Лиганды серы (S^{2-}) обеспечивают более тесный контакт между нанокристаллами, что приводит к большим значениям подвижности носителей зарядов в пленках НК. Кроме того, эти лиганды создают на поверхности нанокристалла большое число ловушек. Это приводит к мультипликативному эффекту, при котором наличие захваченных носителей зарядов одного знака в ловушках усиливает ток носителей зарядов другого знака. Несмотря на малое отношение темнового к световому сопротивлений, образец 6 демонстрирует фототок выше,

чем у образцов 3 и 4. При этом значение чувствительности и удельной обнаружительной способности сравнимы с таковыми для образца 5. Следует отметить, что для данного образца характерно наибольшее значение спектральной плотности шума тока — на порядок выше, чем для образцов 3 и 4.

Образец 7 с использованием замены лигандов на PbI_2 в объеме демонстрирует максимальное отношение темнового к световому сопротивлений и, как следствие, минимальной спектральной плотности шума тока. При этом величина чувствительности достигает 13.3 мА/Вт. Это значение лежит между значениями чувствительности для образцов с лигандами SCN^- и EDT. Значение D^* близко к таковому для образца 4.

Теоретическая оценка дальности обнаружения пламени

Оценка дальности обнаружения пламени датчиком производится с использованием тестового очага пожара. Для этого необходимо определить расстояние, на котором отношение сигнал/шум датчика от данного очага составляет значение, равное 1. Также для оценки области применения фотодетектора важной характеристикой является расстояние от очага, при котором фототок детектора достигает заданной величины. В качестве контрольного значения фототока разумно принять величину равную 100 нА, что является достаточным для уверенного детектирования фотосигнала.

Согласно ГОСТ Р 50898-96, в качестве тестового очага пламени используют 650 г н-гептана на площади 0.1 м². Адиабатическая температура горения н-гептана составляет 2469 К [18].

Спектр пламени в диапазоне длин волн до 2 мкм можно считать планковским, плотность мощности излучения которого для температуры T определяется по закону Стефана–Больцмана:

$$j = \sigma T^4, \quad (4)$$

где $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ Вт/(м² К⁴) — постоянная Стефана–Больцмана.

Мощность излучения $P_s(l)$ источника пламени площадью A' падающего на детектор площадью A на расстоянии l , определяется соотношением:

$$P_s(l) = jA' \frac{A}{4\pi l^2}. \quad (5)$$

Дальность обнаружения пламени определяется из условия равенства мощности излучения P_s и порога чувствительности датчика (NEP), который равен:

$$NEP = \frac{\sqrt{A\Delta f}}{D^*}, \quad (6)$$

где Δf — полоса пропускания, которую принимают равной 1 Гц. Тогда дальность обнаружения пламени l_0 определяется соотношением:

$$l_0 = \sqrt{\frac{jAA'}{4\pi NEP}}. \quad (7)$$

Для определения расстояния уверенного детектирования фотосигнала l_1 , должно выполняться равенство $P_s(l_1)$ и I_1/S , где $I_1 = 100$ нА. Тогда:

$$l_1 = \sqrt{\frac{jAA'S}{4\pi I_1}}. \quad (8)$$

В табл. 3 приведены рассчитанные значения l_0 и l_1 .

Величина l_0 является предельной теоретической оценкой дальности обнаружения пламени. Поэтому ее характерное значение составляет единицы–десятки километров. Обнаружение пламени на таком расстоянии возможно только в идеальных условиях, т.е. при отсутствии засветки и прямой видимости в отсутствии влияния атмосферы. Более практичной величиной выступает l_1 . Она отвечает расстоянию уверенной регистрации фотосигнала конкретного фотоприемника. По ее величине можно сделать оценку о предельных расстояниях на которых сигнала фотодетектора будет достоверно зарегистрирован в реальных условиях.

Среди исследованных фоторезисторов образцы 1, 2 и 7 продемонстрировали величину l_1 в пределах от 5 до 11 м. Детекторы с такими характеристиками пригодны для использования в небольших технических помещениях. Образцы 3 и 4 обладают расстоянием l_1 около 50 и 20 м соответственно. Это характерные размеры небольших складских помещений и цехов. Рекордные показатели по тому же параметру демонстрируют образцы 5 и 6: расстояние уверенного детектирования фотосигнала составляет более 80 м; такие детекторы могут быть использованы в промышленных помещениях и больших складах.

Следует подчеркнуть, что использованный в измерениях вольт-амперных характеристик источник излучения имел падающую на фотодетектор мощность, которая соответствует мощности рассмотренного тестового очага на расстоянии 26.5 м. Поэтому приведенные в табл. 3 фотоэлектрические характеристики соответствуют оценкам для небольших складских помещений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрирована возможность применения полупроводниковых нанокристаллов в фотодетекторах для оптической регистрации открытого пламени. Показано, что детектирование пламени в области 1.0–1.5 мкм позволяет фиксировать продукты горения любого состава в широком диапазоне температур. Синтезированы нанокристаллы сульфидов

да свинца, поглощающие в этой области. Изготовлены фоторезисторы на их основе с разным лигандным составом и измерены их фотоэлектрические характеристики. Обнаружено, что образец с оксидом свинца в качестве прекурсора и ТВАИ в качестве замещающего лиганда обладает чувствительностью 0.92 А/Вт и удельной обнаружительной способностью 2.84×10^{10} см $\sqrt{\text{Гц/Вт}}$. Сделана теоретическая оценка, что этот образец способен уверенно детектировать тестовый очаг пламени на расстоянии 90 м. Датчики пламени с такими характеристиками могут быть востребованы в больших технических и складских помещениях.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа поддержана Фондом Содействия Инновациям (договор 49ГУРЭС14/72776 от 27.12.2021).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Brushlinsky N.N., Ahrens M., Sokolov S.V., Wagner P.* // World fire statistics. CTIF. 2022. № 27.
2. *Gaur A. et al.* // "Fire Sensing Technologies: A Review" in IEEE Sensors Journal. 2019. 19 (9). P. 3191–3202.
3. *Piccardi A., Colace L.* // Sensors. 2019. 19. 1360.
4. *Adrienne D. Stiff-Roberts* // Journal of Nanophotonics. 2019. 3 (1). 031607.
5. *Yadav P.V.K. et al.* // Chemosphere. 2019. 279. 130473.
6. *Екимов А.И., Онущенко А.А.* // Письма в ЖЭТФ. 1981. №. 34. С. 363.
7. *Эфрос Ал.Л., Эфрос А.Л.* // Физика и техника полупроводников. 1982. 16 (7). 1209–1214.
8. *Бричкин С.Б., Разумов В.Ф.* // Успехи химии. 2016. 85: 12. 1297–1312.
9. *Christopher M. Evans et al.* // Journal of Coordination Chemistry. 2012. 65: 13. 2391–2–414.
10. *Sokolova D. et al.* // Infrared Physics & Technology. 2017. V. 123. 104188.
11. *Бричкин С.Б., Гак В.Ю., Спиринов М.Г.* // Химия высоких энергий. 2020. 54 (1). 43–53.
12. *Гак В.Ю., Гадомская А.В., Спиринов М.Г.* // Химия высоких энергий. 2022. 56 (2). 104–114.
13. *Nakotte T., Luo H., Pietryga J.* // Nanomaterials. 2020. 10. 172.
14. *De Iacovo A. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2017. 111. 211104.
15. *Rafal Sliz et al.* // ACS Nano 2019. 13 (10). 11988–11995.
16. *Fristrom R.M.* Flame Structures and Processes, Oxford University Press, New York, 1995.
17. *Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И.* Математическая теория горения и взрыва. М.: 1980. 478 с.
18. *Engineering ToolBox*, (2005). Adiabatic Flame Temperatures. [online] доступно по адресу: https://www.engineeringtoolbox.com/adiabatic-flame-temperature-d_996.html [Accessed 01.02.2023]