

Перспективы разработки фотоприемных устройств SWIR-диапазона с коллоидными квантовыми точками

А. А. Егоренков^{1,2✉}, Д. С. Мазинг¹, Р. А. Аввакумов^{1,2},
С. Н. Челышков^{1,2}, В. И. Зубков¹, В. А. Мошников¹

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² АО «ЦНИИ „Электрон“», Санкт-Петербург, Россия

✉ a.egorenkov@niielectron.ru

Аннотация. Рассматриваются современные фотодетекторы инфракрасного диапазона (ИК) на основе полупроводниковых коллоидных квантовых точек (ККТ), в том числе ККТ PbS, нанесенные на кремний. Демонстрируется механизм возникновения фототока, связанный с генерацией экситонов в ККТ PbS и Si и последующей их диссоциацией на границе раздела ККТ/Si с переносом носителей заряда в электроды. Показано, что для обеспечения качественного интерфейса гетероперехода ККТ PbS/Si и увеличения эффективности сбора носителей фототока необходима пассивация поверхности кремния. Рассмотрены методы пассивации кремния, приводящие к наибольшему значению внешней квантовой эффективности. Проведено оценочное моделирование гетероперехода ККТ PbS с экситонным пиком на 1550 нм и Si.

Ключевые слова: инфракрасные фотодетекторы, коллоидные квантовые точки, пассивация поверхности кремния, PbS.

Для цитирования: Перспективы разработки фотоприемных устройств SWIR-диапазона с коллоидными квантовыми точками / А. А. Егоренков, Д. С. Мазинг, Р. А. Аввакумов, С. Н. Челышков, В. И. Зубков, В. А. Мошников // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 6. С. 24–34. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-6-24-34.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Perspectives for the Development of SWIR-Band Photodetectors with Colloidal Quantum Dots

A. A. Egorenkov^{1,2✉}, D. S. Mazing¹, R. A. Avvakumov^{1,2},
S. N. Chelyshkov^{1,2}, V. I. Zubkov¹, V. A. Moshnikov¹

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

² JSC «NRI Electron», Saint Petersburg, Russia

✉ a.egorenkov@niielectron.ru

Abstract. Modern infrared (IR) photodetectors based on semiconductor colloidal quantum dots (CQDs), including PbS CQDs deposited on silicon, are considered. The mechanism of photocurrent generation associated with exciton generation in PbS and Si CQDs and their subsequent dissociation at the CQD/Si interface with charge carrier transfer to the electrodes is demonstrated. In order to ensure a high-quality interface of the PbS/Si heterojunction and increased efficiency of photocurrent carrier collection, silicon surface passivation was shown to be necessary. Methods for silicon passivation leading to the highest external quantum efficiency are discussed. An evaluative modeling of the Si/PbS CQD heterojunction with an excitonic peak at 1550 nm is conducted.

Keywords: infrared photodetectors, colloidal quantum dots, silicon surface passivation, PbS

For citation: Perspectives for the Development of SWIR-Band Photodetectors with Colloidal Quantum Dots / A. A. Egorenkov, D. S. Mazing, R. A. Avvakumov, S. N. Chelyshkov, V. I. Zubkov, V. A. Moshnikov // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 6. P. 24–34. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-6-24-34.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Инфракрасные фотодетекторы играют огромную роль в современном мире, так как общество нашло им применение в различных промышленных и научных областях, таких как приборы ночного видения, средства связи и навигации, контроль окружающей среды, дистанционное зондирование атмосферы Земли, астрономическое наблюдение планет, солнечная энергетика [1]–[4]. На сегодняшний день наиболее распространенными детекторами инфракрасного (ИК) диапазона излучения, работающими в окнах прозрачности атмосферы 3...5 и 8...12 мкм, представлены полупроводниковыми соединениями InSb, HgCdTe соответственно. Однако данные структуры имеют ряд существенных недостатков, один из которых – низкая рабочая температура [5], [6]. В ближнем и коротковолновом инфракрасном диапазоне основными приемниками излучения служат твердые растворы InGaAs, InAs [7], [8].

В последнее время большое внимание уделяется разработке фоточувствительных структур и фотодетекторов коротковолнового ИК-диапазона (SWIR) на основе коллоидных квантовых точек (ККТ). Повышенный интерес к использованию ККТ в SWIR-структурах связано с высокой стоимостью классических SWIR-фотодетекторов на основе эпитаксиальных гетероструктур InGaAs/GaAs. Коллоидные КТ представляют собой нанокристаллы полупроводникового материала, синтезируемые методами коллоидной химии, в которых устанавливается пространственное ограничение носителей заряда во всех трех измерениях (нуль-мерный объект). Привлекательность коллоидных КТ для разработки оптоэлектронных устройств в целом, и SWIR-фотодетекторов в частности, связано с несколькими факторами. С одной стороны, это обусловлено чисто физическими особенностями ККТ – возможностью перестройки края оптического поглощения и люминесценцией в широких пределах изменением размера нанокристаллов за счет эффекта размерного квантования, сниженные эффекты электрон-фононного взаимодействия. С другой стороны, привлекательна потенциальная технологичность формирования структур на основе ККТ, например по сравнению с эпитаксиально формируемыми

квантовыми точками, с перспективой эффективного масштабирования для промышленного производства. Принципиально технологии формирования слоев из коллоидных растворов не нуждаются в использовании дорогостоящего оборудования, однако требуют решения вопросы, связанные с обеспечением транспорта носителей заряда (формирование транспортных слоев, управлением химическим составом поверхности ККТ для уменьшения расстояния между кристаллами) и совмещением технологии ККТ с интегральной кремниевой электроникой.

Один из перспективных подходов к применению ККТ в технологии ИК-фотодетекторов – расширение диапазона поглощения стандартных кремниевых фоточувствительных структур за счет формирования дополнительного функционального поглощающего слоя ККТ.

Среди материалов коллоидных квантовых точек для ближнего ИК-диапазона следует выделить следующие классы: ККТ IV группы (Si, Ge), $A^{IV}B^{VI}$ – (PbS, PbSe, PbTe), $A^{III}B^{V}$ – (InAs, InSb), $A^{I}B^{VI}$ – (Ag₂S, Ag₂Se, Ag₂Te), $A^{I}B^{III}C^{VI}$ – (CuInSe₂, AgInSe₂), $A^{II}B^{VI}$ – HgSe, HgTe. В настоящий момент применительно к разработке SWIR-фотодетекторов наибольшее внимание уделяется ККТ PbS и ККТ на основе халькогенидов ртути.

Перспективными также выглядят ККТ на основе полупроводников $A^{III}B^{V}$, в частности на основе InSb, обладающего узкой запрещенной зоной (0.17 эВ), высокой подвижностью электронов ($7.7 \cdot 10^4$ см²/В · с), а также большим боровским радиусом экситона – 61 нм, что обуславливает возможность регулирования края поглощения в режиме пространственного квантования в широком диапазоне размеров нанокристалла. Основная сложность в применении данного класса ККТ лежит в недостаточном развитии технологии синтеза нанокристаллов в связи с высокой степенью ковалентности связей и ограниченным ассортиментом прекурсоров с подходящей реакционной способностью; причем в случае InSb, даже по сравнению с другими ККТ $A^{III}B^{V}$, данные проблемы проявляются наиболее остро [9], что обуславливает повышенные требования к усло-

виям синтеза (высокие температуры, качество инертной атмосферы). Применение ККТ InSb в качестве материала функционального слоя при разработке фотодетектора с диапазоном чувствительности >1500 нм и внешним квантовым выходом, достигающим 11.4 % в области 1370 нм, было продемонстрировано в [10].

Также получили развитие эксперименты по разработке фотодетекторов на основе ККТ InAs ($E_g = 0.35$ эВ). Несмотря на достигнутые высокие значения внешнего квантового выхода – более 30 % на длине волны 940 нм [11], расширение диапазона чувствительности за 1500 нм требует оптимизации технологии синтеза ККТ InAs со средним размером кристаллов более 10 нм.

Одно из потенциальных преимуществ функциональных слоев на основе ККТ A^{III}B^V по сравнению с ККТ PbS – кратно меньшие значения относительной диэлектрической проницаемости, что может позволить избежать замедленного разделения заряда, вызванного экранированием и емкостными эффектами.

Коллоидные КТ халькогенидов серебра представляются другой перспективной системой для разработки устройств SWIR-диапазона. Особое внимание до настоящего времени было уделено нестехиометрическим ККТ Ag_xSe ($x > 2$), в которых за счет внутрizonных переходов была продемонстрирована возможность перестройки полосы поглощения от коротковолнового до средне-волнового инфракрасного диапазона (MWIR) [12], [13], при этом типичное положение края поглощения, отвечающего межзонным переходам в данных ККТ, как правило, не превышает 1400 нм [14]. С точки зрения расширенного до MWIR рабочего диапазона, коллоидные КТ данного типа являются альтернативой нанокристаллам на основе солей ртути. Потенциальным недостатком данной системы может стать электрохимическая неустойчивость слоев ККТ Ag₂Se, вероятно связанная с окислительно-восстановительными реакциями с участием Ag⁺ [15].

В [16] был продемонстрирован SWIR-фотодиод на основе ККТ Ag₂Te. Синтезированные авторами нанокристаллы (НК) обладали перестройкой длины волны первого экситонного пика поглощения от 1050 до 1920 нм. Для снижения темного тока обратного смещения и повышения внешней квантовой эффективности (EQE) в структуре был использован буферный слой НК AgBiS₂. При этом EQE при нулевом смещении

достигла 20 %. Для создания экспериментального сенсорного SWIR-имиджера (современное название линейного фотосканера штрих-кода), работоспособного при комнатной температуре, разработанный фотодиод был интегрирован с кремниевой интегральной схемой считывания. Внешняя квантовая эффективность фотодетектора достигала 9 % на длине волны 1200 нм при нулевом смещении.

На настоящий момент коллоидные КТ на основе PbS являются наиболее активно используемой нанокристаллической системой для реализации активных слоев SWIR-фотодетекторов на коллоидных полупроводниковых нанокристаллах. Связано это как с оптимальным диапазоном перестройки края собственного поглощения ККТ PbS (вплоть до длины волны 2.6 мкм [17]), так и относительно высокой устойчивостью к окислению по сравнению с другими халькогенидами свинца. Оптимизация электронных характеристик слоев ККТ PbS может быть достигнута за счет модификации поверхности нанокристаллов за счет замены исходных лигандов, используемых в ходе непосредственного синтеза частиц. Замена лигандов производится либо в растворе, либо в процессе последовательного нанесения активных нанокристаллических слоев (например, с использованием центрифугирования).

Для достижения необходимых транспортных характеристик ККТ PbS, как будет показано далее в статье, важное значение играет модификация поверхности ККТ PbS. Пассивация поверхности кремния также играет ключевую роль в повышении эффективности переноса носителей заряда между ККТ PbS и Si. Освещение и подбор оптимальных методов синтеза ККТ PbS и последующая интеграция с существующей кремниевой технологией с целью расширения спектральной чувствительности доступных кремниевых фотоприемников в SWIR-диапазон служит предметом данной статьи.

Интеграция ККТ PbS с Si. Многие подходы в исследовании интеграции ККТ на кремний (в частности, на аморфный a-Si) сосредоточены на двухслойных гетеропереходах *p-n*-типа. Экспериментально показано, что в переходе ККТ PbS/a-Si экситоны, генерируемые при воздействии излучения, диссоциируют вблизи поверхности границы раздела за счет выравнивания энергетических зон [18]. Для уменьшения транспортных потерь слой a-Si выращивался достаточно тонким (50 нм) и выступал как буферный, поэтому при длинах волн излучения более 800 нм внешний

квантовый выход повторяет спектр поглощения ККТ PbS, что обуславливает вклад носителей заряда, генерируемых только в PbS. Кроме того, высокая плотность поверхностных дефектов при выращивании a-Si методами электронно-лучевого испарения и магнетронного испарения снижает эффективность переноса заряда через гетерограницу ККТ PbS/a-Si.

Авторы статьи [19] сообщают о повышении эффективности сбора носителей заряда за счет использования перехода нанострия Si/ККТ PbS. Нанострии кремния были получены на пластинах кремния *n*-типа кристаллографического направления [1 0 0] методом реактивного ионного травления с самоорганизующимися наночастицами серебра в качестве маски [20]. Для создания омических контактов на обратной стороне кремниевой пластины наносили алюминиевые электроды толщиной 300 нм. Полученные кремниевые нанострии погружали в коллоидный раствор PbS концентрацией 20 мг/мл с последующим центрифугированием при 800 об/мин в течение 30 с. Полученная пленка была обработана раствором этандитиола-1,2, выступающим в качестве сшивающего агента для обмена молекул олеиновой кислоты на поверхности ККТ. Процесс повторяли до заполнения пространства между наностриями Si. Для завершения структуры методом термического испарения нанесли полупрозрачные электроды из Ag. Нанострии кремния показали низкий коэффициент отражения по сравнению с пластинами Si (порядка 3–6 % в видимой области). Принципиальная схема полученного фотодетектора приведена на рис. 1.

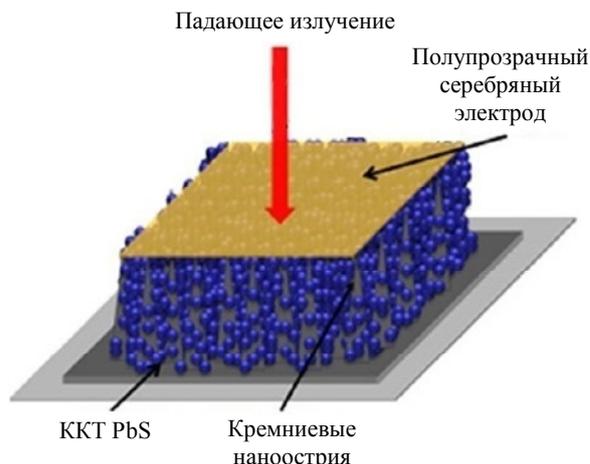


Рис. 1. Принципиальная схема фотодетектора на гетеропереходе нанострия Si/ККТ PbS
Fig. 1. Schematic diagram of the photodetector on heterojunction nanotips Si/CQD PbS

Энергетическая диаграмма полученной структуры представлена на рис. 2, а (X_0 – значение координаты гетерограницы по оси X ; λ – длина волны падающего излучения). После приведения слоя PbS и Si в контакт образуется анизотипный гетеропереход 2-го типа и происходит выравнивание зон. Под действием излучения в Si и ККТ генерируются экситоны, которые могут диссоциировать на гетерогранице с пространственным разделением носителей заряда: электроны переходят в *n*-Si, а дырки – в *p*-PbS. Далее носители заряда собираются соответствующими электродами.

На рис. 2, б представлена зависимость плотности тока от напряжения ($J-U$) при моделируемом солнечном освещении (AM 1.5 мощностью 100 мВт/см²) для нанострий Si/PbS и кремниевой пластины/PbS.

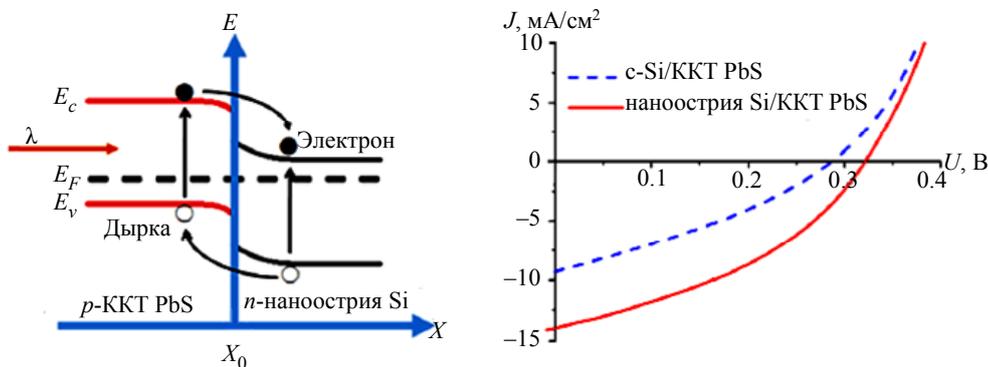


Рис. 2. а – Энергетическая диаграмма гетероструктуры; б – вольтамперные ($J-U$) характеристики полученного прибора, в сравнении с характеристиками ККТ PbS, нанесенными на пластину Si
Fig. 2. а – Energy diagram of the heterostructure; б – current-voltage ($J-U$) characteristics of the fabricated device, in comparison with the characteristics of PbS colloidal quantum dots deposited on Si wafer
 E_C – energy of the conduction band, E_F – energy of the Fermi level, E_V – energy of the valence band

Изготовленное устройство на кремниевых наностриях показывает лучшие характеристики плотности тока короткого замыкания ($J_{КЗ} = 14.17 \text{ мА/см}^2$), по сравнению с аналогичным устройством на кремниевой пластине ($J_{КЗ} = 9.34 \text{ мА/см}^2$).

Однако полученная структура имеет ряд существенных недостатков. Во-первых, электрон-дырочные пары могут диссоциировать на границе раздела PbS/Ag и создавать шунтирующий ток, противодействующий фототоку. Для решения этого недостатка был нанесен слой фталоцианина меди (CuPc) толщиной 5...8 нм, который блокирует инжекцию электронов в Ag. Существенным недостатком оказывается отсутствие заметного извлечения заряда при освещении светом с $\lambda > 1100 \text{ нм}$. Основные причины заключаются в низком качестве гетерограницы, обусловленном большим количеством поверхностных дефектов.

Качественный гетеропереход между ККТ и кристаллическим кремнием (с-Si), который бы способствовал эффективному сбору фотозарядов со слоя ККТ, должен удовлетворять как минимум трем требованиям. Во-первых, тесный контакт между ККТ и с-Si должен быть лишен межфазных дефектов, которые ограничивают свободное передвижение фотоносителей через гетерограницу и приводят к их рекомбинации. Во-вторых, при появлении контактной разности потенциалов и установлении термодинамического равновесия системы изгибы энергетических зон двух полупроводников не должны приводить к образованию высоких потенциальных барьеров для фотоносителей. В-третьих, поскольку в ККТ электрический транспорт затруднен, необходимо, чтобы область обеднения, в которой происходит возникновение встроенного электрического поля, существенно простиралась в слой ККТ. В результате проведения исследований [21]–[24], целью которых было создание эффективного фотодиода на основе интеграции ККТ PbS и с-Si, позволяющей расширить рабочий спектральный диапазон прибора до ближнего ИК, было определено, что правильная пассивация поверхности очищенного кремния перед контактом с ККТ позволяет достичь одновременного выполнения вышперечисленных условий для такой гетероструктуры. Иными словами, процесс пассивации поверхности Si имеет решающее значение для уменьшения рекомбинации зарядов и содействия их переносу на гетерогранице Si/ККТ.

Одним из успешных методов пассивации представляет одностадийная обработка поверхности кремния йодистым метилом (CH_3I) [21]. Молекула CH_3I может расщепляться на метильные и йодные радикалы под действием УФ-облучения, которые впоследствии образуют ковалентные связи с не полностью координированными атомами Si (после его очистки от естественного оксида). Из-за разноименных знаков зарядов хемосорбированных радикалов и атомов кремния между ними возникает межфазный дипольный момент. На энергетической диаграмме данный диполь вносит дополнительный вклад в разрыв уровня вакуума между ККТ и с-Si после их соприкосновения, что в зависимости от оптимально подобранных параметров структур способствует образованию гетероперехода 2-го типа, который благоприятен для дальнейшего транспорта фотоносителей. Использование данного метода пассивации поверхности кремния позволило достичь значений внешнего квантового выхода 14 [21] и 21 % [22] для фотодиодов на гетероструктурах Si/ККТ PbS на экситонных пиках ККТ при 1230 и 1540 нм соответственно в условиях короткого замыкания, т. е. при напряжении смещения $U_{\text{см}} = 0 \text{ В}$.

В [23] авторы представили альтернативный способ пассивации кремния, суть которого заключается в нанесении тонкого слоя оксида цинка (ZnO) на свежеччищенную поверхность кремния. Используемый оксид эффективно уменьшает поверхностные оборванные связи Si и при дальнейшем нанесении ККТ приводит к образованию выпрямляющего гетероперехода, способного эффективно разделять фотоносители (возникает большой потенциальный барьер для дырок). С использованием оксида цинка толщиной 10 нм в качестве пассивирующего слоя авторами реализован фотодиод на основе гетероструктуры Si/ККТ PbS, достигающий значения квантовой эффективности 5.9 и 18 % на экситонном пике при 1490 нм в условиях короткого замыкания и при напряжении смещения $U_{\text{см}} = -0.25 \text{ В}$ соответственно.

Наиболее эффективным методом пассивации поверхности Si среди других оказалась двухстадийная обработка Si последовательными друг за другом процессами хлорирования пентахлоридом фосфора (PCl_5) и метилирования реактивом Гриньяра (CH_3MgCl) [24]. Окончательным итогом такой обработки становится образование практически на всей поверхности (может достигать 100 %) ковалентной связи Si- CH_3 , которая впоследствии,

благодаря малому диаметру Ван-дер-Ваальса метильной группы, менее склонна препятствовать переносу заряда через гетерограницу Si/ККТ, а также образует встроенный диполь, изменяющий зонную структуру полупроводников. Благодаря двухэтапной обработке поверхности кремния авторы [24] разработали высококачественный фотодиод на основе гетероперехода p -Si/ n -ККТ PbS с нанесенным поверх ККТ тонким слоем наночастиц ZnO, который выступал в качестве барьера для дырочных фотоносителей (рис. 3, а, б). На рис. 3, б указаны значения потолка валентной зоны и дна зоны проводимости рассматриваемых материалов.

Пленка ККТ PbS была выращена на пассивированной подложке Si с помощью послойного метода, принцип которого заключается в поочередном нанесении и дальнейшем центрифугировании сначала небольшого количества октанового раствора ККТ PbS, а затем метанольного раствора йодида тетрабутиламмония (ТБАИ). Добавление раствора ТБАИ позволяет произвести обмен лигандами с ККТ, что делает их полупроводниками

n -типа. Процесс повторяется несколько раз для достижения необходимой толщины пленки. Вольтамперные характеристики (ВАХ), снятые при освещении волной с длиной 1300 нм для разработанного фотодиода, представлены на рис. 3, в. Спектральные же характеристики демонстрируют, что устройство имеет значение внешнего квантового выхода $EQE = 22.5$ и 31 % на экситонном пике при 1260 нм при напряжении смещения -2 и -4 В, соответственно (рис. 3, г).

Основной промышленный интерес представляет расширение диапазона поглощения стандартных кремниевых фотоприемников, например фотодиода на основе p - n -перехода, до так называемых окон прозрачности атмосферы, что соответствует длинам волн 1.3 или 1.55 мкм. Как уже отмечалось, ККТ обладают возможностью перестройки края полосы поглощения за счет изменения геометрических размеров. На рис. 4 представлена смоделированная зонная диаграмма p - n -гетероперехода в равновесии между n -ККТ PbS и p -Si. Диаметр сферических ККТ ($d \approx 6$ нм) подобран под пик поглощения экситонов, равный

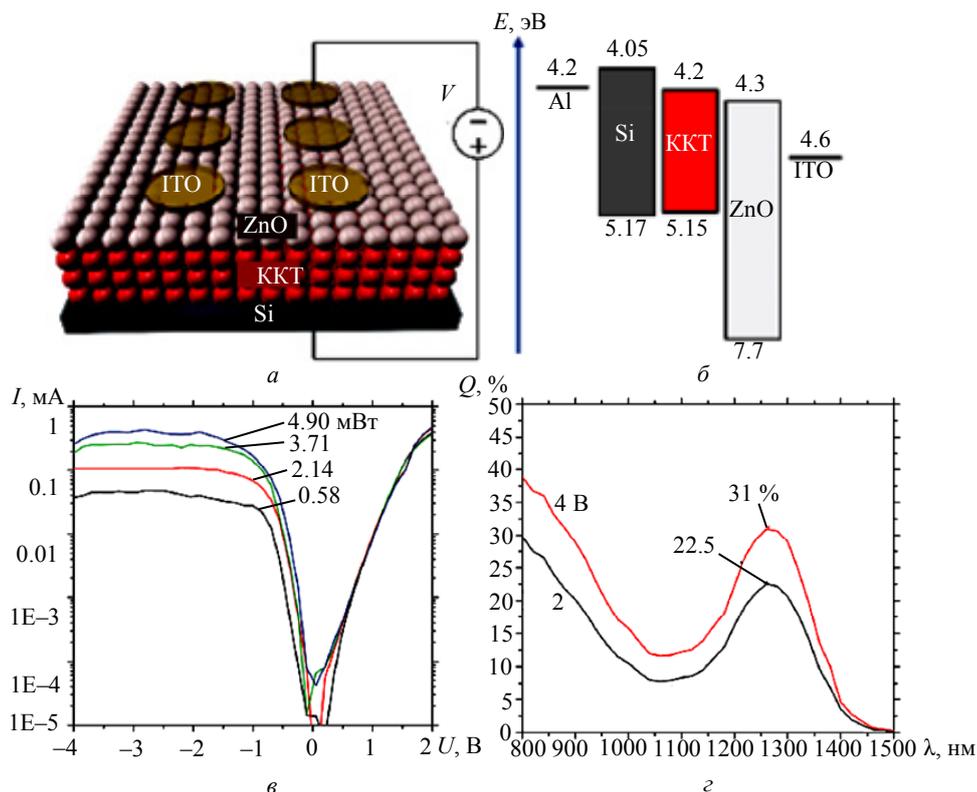


Рис. 3, а – структура фотодиода с гетеропереходом p -Si/ n -ККТ PbS; б – диаграмма энергетических зон гетероперехода; в – ВАХ при освещении фотоприемника светодиодом с длиной волны 1300 нм; г – спектр внешнего квантового выхода разработанного устройства [24]

Fig. 3, а – structure of the photodiode with the p -Si/ n -PbS colloidal quantum dot heterojunction; б – band energy diagram of the heterostructure; в – current-voltage characteristics (I-V curve) of the photodiode under illumination with 1300 nm wavelength LED; г – external quantum efficiency spectrum of the developed device [24]

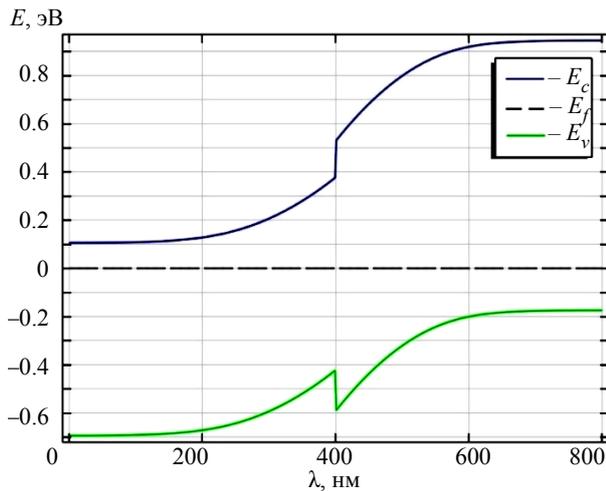


Рис. 4. Диаграмма энергетических зон гетероперехода n -ККТ PbS/ p -Si. E_C – энергия дна зоны проводимости, E_F – энергия уровня Ферми, E_V – энергия потолка валентной зоны

Fig. 4. Band diagram of n -PbS/ p -Si heterojunction. E_C – conduction band, E_F – Fermi level, E_V – valence band

1.5 мкм [20]. Концентрация доноров и акцепторов в данном случае была выбрана $N_D = N_A = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Значения диэлектрической проницаемости и положения дна зоны проводимости взяты из литературы [24], [25]. Ширина запрещенной зоны ККТ взята как край полосы поглощения экситонного пика. Данная модель – оценочная и не описывает реального положения дел при приведении двух полупроводников в контакт. Однако, даже исходя из такой модели, можно сделать предположение, что при должной пассивации поверхности кремния и обеспечения транспорта носителей заряда в ККТ, возможно получить фотодетектор на основе p - n -перехода n -ККТ

PbS и p -Si, работающий в окне прозрачности атмосферы на длине волны 1.55 мкм.

Заключение. В литературе многие публикации посвящены фотоприемникам на основе ККТ. Существующие методы внедрения ККТ PbS на кремниевые интегральные схемы считывания основаны чаще всего на послойном нанесении ККТ с дальнейшим центрифугированием. Было показано, что в равновесии образуется гетеропереход ККТ PbS/Si. При освещении происходит генерация экситонов в обедненных слоях с дальнейшей их диссоциацией на границе раздела и последующий перенос носителей заряда на соответствующие электроды. Для эффективного обеспечения транспорта носителей заряда необходимо заменять лиганды ККТ при нанесении для получения необходимого типа проводимости. Для получения качественной гетерограницы можно последовательно использовать процессы хлорирования пентахлоридом фосфора и метилирования реактивом Гриньяра. Показано, что с помощью данного метода пассивации поверхности Si можно получить прибор с внешней квантовой эффективностью до 31 % при положении экситонного пика ККТ 1260 нм. Проведено оценочное моделирование p - n -перехода между n -ККТ PbS размером 6 нм (что соответствует экситонному пику ≈ 1500 нм) и p -Si. Используя приведенные методы пассивации Si и формирования транспортных слоев ККТ PbS, можно существенно расширить диапазон спектральной чувствительности кремниевых фотодетекторов в SWIR-диапазон, в том числе в так называемые окна прозрачности атмосферы.

Список литературы

1. Colloidal HgTe nanocrystals with widely tunable narrow band gap energies: from telecommunications to molecular vibrations / M. V. Kovalenko, E. Kaufmann, D. Pachinger, J. Roither, M. Huber, J. Stangl, G. Hesser, F. Schaffler, W. Heiss // J. Am. Chem. Soc. 2006. Vol. 128, no. 11. P. 3516–3517. doi: 10.1021/ja058440j.
2. Айнбунд М. Р., Миронов Д. Е., Зубков В. И. Гибридные фотоэлектронные приборы (обзор) // Успехи прикладной физики, 2018. Т. 6, № 5. С. 401-408.
3. Air-stable all-inorganic nanocrystal solar cells processed from solution / I. Gur, N. A. Fromer, M. L. Geier, A. P. Alivisatos // Sci. 2005. Vol. 310, no. 5747. P. 462–465. doi: 10.1126/science.1117908.
4. Rogalski A., Antoszewski J., Faraone L. Third-generation infrared photodetector arrays // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 105, no. 9. P. 091101. doi: 10.1063/1.3099572.
5. Pat. №US005646437A. Indium antimonide (InSb) photodetector device and structure for infrared, visible

and ultraviolet radiation / I. Kasai, J. R. Toman. From 02.06.1994; publ. 08.07.1994. 5 с.

6. Rogalski A. HgCdTe photodetectors // Mid-infrared optoelectronics. 2020. P. 235–335. doi: 10.1016/B978-0-08-102709-7.00007-3.

7. Kaniewski J., Piotrowski J. InGaAs for infrared photodetectors. Physics and technology. Opto-Electronics Review. 2004. Vol. 12(1). P. 139–148.

8. InAs on GaAs photodetectors using thin InAlAs graded buffers and their application to exceeding short-wave infrared imaging at 300 K / S. S. Kang, D. M. Geum, K. Kwak, J. H. Kang, C. H. Shim, H. Y. Hyun, S. H. Kim, W. J. Choi, S. H. Choi, M. C. Park, J. D. Song // Scientific Reports. 2019. Vol. 9(1). P. 12875. (1–8). doi: 10.1038/s41598-019-49300-z.

9. Luminescent colloidal InSb quantum dots from in situ generated single-source precursor / S. Busatto,

M. de Ruiter, J. T. Jastrzebski, W. Albrecht, V. Pinchetti, S. Brovelli, S. Bals, M. E. Moret, C. de Mello Donega // *ACS Nano*. 2020. Vol. 14, no. 10. P. 13146-13160. doi: 10.1021/acsnano.0c04744.

10. Colloidal InSb quantum dots for 1500 nm SWIR photodetector with antioxidation of surface / H. Seo, H. J. Eun, A. Y. Lee, H. K. Lee, J. H. Kim, S. W. Kim // *Advanced Sci.* 2023. Vol. 11, no. 4. P. 2306439. doi: 10.1002/advs.202306439.

11. Fast near-infrared photodetection using III-V colloidal quantum dots / B. Sun, A. M. Najarian, L. K. Sagar, M. Biondi, M. J. Choi, X. Li, L. Levina, S. W. Baek, C. Zheng, S. Lee, A. R. Kirmani, R. Sabatini, J. Abed, M. Liu, M. Vafaie, P. Li, L. J. Richter, O. Voznyy, M. Chekini, Z. H. Lu, F. P. G. de Arquer, E. H. Sargent // *Advanced Materials*. 2022. Vol. 34, no. 33. P. 2203039. doi: 10.1002/adma.202203039.

12. Room temperature synthesis of self-doped silver selenide quantum dots sensitive to mid-infrared light / M. N. An, S. Y. Eom, J. H. Lee, H. Song, M. Cho, K. S. Jeong // *ACS Appl. Nano Materials*. 2023. Vol. 6, no. 23. P. 22488–22495. doi: 10.1021/acsnm.3c05043.

13. Silver selenide colloidal quantum dots for mid-wavelength infrared photodetection / S. B. Hafiz, M. R. Scimeca, P. Zhao, I. J. Paredes, A. Sahu, D. K. Ko // *ACS Appl. Nano Materials*. 2019. Vol. 2, no. 3. P. 1631–1636. doi: 10.1021/acsnm.9b00069.

14. Colloidal quantum dot based infrared detectors: extending to the mid-infrared and moving from the lab to the field / T. Nakotte, S. G. Munyan, J. W. Murphy, S. A. Hawks, S. Kang, J. Han, A. M. Hiszpanski // *J. of Materials Chem. C*. 2022. Vol. 10, no. 3. P. 790–804. doi: 10.1039/D1TC05359K.

15. Intraband mid-infrared transitions in Ag₂Se nanocrystals: potential and limitations for Hg-free low-cost photodetection / J. Qu, N. Goubet, C. Livache, B. Martinez, Amelot D., Greboval C., Chu A., Ramade J., Cruguel H., S. Ithurria, M. G. Silly, E. Lhuillier // *The J. of Phys. Chem. C*. 2018. Vol. 122, no. 31. P. 18161–18167. doi: 10.1021/acs.jpcc.8b05699.

16. Silver telluride colloidal quantum dot infrared photodetectors and image sensors / Y. Wang, L. Peng, J. Schreier, Y. Bi, A. Black, A. Malla, S. Goossens, G. Konstantatos // *Nature Photonics*. 2024. Vol. 18, no. 3. P. 1–7. doi: 10.1038/s41566-023-01345-3.

17. Long-wavelength lead sulfide quantum dots sensing up to 2600 nm for short-wavelength infrared

photodetectors / C. Dong, S. Liu, N. Barange, J. Lee, T. Pardue, X. Yi, S. Yin, F. So // *ACS Appl. Materials & Interfaces*. 2019. Vol. 11, no. 47. P. 44451–44457. doi:10.1021/acsnano.9b16539.

18. Hybrid photovoltaics based on semiconductor nanocrystals and amorphous silicon / B. Sun, A. T. Findikoglu, M. Sykora, D. J. Werder, V. I. Klimov // *Nano Lett.* 2009. Vol. 9, no. 3. P. 1235–1241. doi: 10.1021/nl9001469.

19. Efficient light harvesting and carrier transport in PbS quantum dots-silicon nanotips heterojunctions / C. Y. Huang, D. Y. Wang, C. H. Wang, Y. T. Wang, Y. T. Jiang, Y. J. Yang, C. C. Chen, Y. F. Chen // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2011. Vol. 44, no. 8. P. 085103. doi:10.1088/0022-3727/44/8/085103.

20. Efficient light harvesting by photon down-conversion and light trapping in hybrid ZnS nanoparticles/Si nanotips solar cells / C. Y. Huang, D. Y. Wang, C. H. Wang, Y. T. Chen, Y. T. Wang, Y. T. Jiang, Y. J. Yang, C. C. Chen, Y. F. Chen // *ACS Nano*. 2010. Vol. 4, no. 10. P. 5849–5854. doi: 10.1021/nn101817s.

21. The silicon: Colloidal quantum dot heterojunction / S. Masala, V. Adinolfi, J. P. Sun, S. D. Gobbo, O. Voznyy, I. J. Kramer, I. G. Hill, E. H. Sargent // *Advanced Materials*. 2015. Vol. 27, no. 45. P. 7445–7450. doi: 10.1002/adma.201503212.

22. Inverted Si:PbS colloidal quantum dots heterojunction-based infrared photodetector / K. Xu, X. Xiao, W. Zhou, X. Jiang, Q. Wei, H. Chen, Z. Deng, J. Huang, B. Chen, Z. Ning // *ACS Appl. Materials & Interfaces*. 2020. Vol. 12, no. 13. P. 15414–15421. doi: 10.1021/acsnano.1c01744.

23. High quality silicon: Colloidal quantum dot heterojunction based infrared photodetector / X. Xiao, K. Xu, M. Yin, Y. Qiu, W. Zhou, L. Zheng, X. Cheng, Y. Yu, Z. Ning // *Appl. Phys. Lett.* 2020. Vol. 116, no. 10. P. 101102. doi:10.1063/1.5140255.

24. Silicon surface passivation for silicon-colloidal quantum dot heterojunction photodetectors / Q. Xu, I. T. Cheong, L. Meng, J. G. C. Veinot, X. Wang // *ACS Nano*. 2021. Vol. 15, no. 11. P. 18429–18436. doi: 10.1021/acsnano.1c08002.

25. Burstein E., Perkkowitz S., Brodsky M. H. The dielectric properties of the cubic IV-VI compound semiconductors // *J. Phys. Colloques*. 1968. Vol. 29, no. C4. P. 78–83. doi: 10.1051/jphyscol:1968411.

Информация об авторах

Егоренков Артем Александрович – аспирант кафедры микро- и нанoeлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ», нач. отдела АО «ЦНИИ „Электрон“», проспект Тореза, 68 лит. Р, Санкт-Петербург, 194223, Россия.

E-mail: a.egorenkov@niielectron.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0084-564X>

Мазинг Дмитрий Сергеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: dmazing@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3601-9208>

Аввакумов Роман Андреевич – студент кафедры микро- и нанoeлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ», инженер 3 кат. АО «ЦНИИ «Электрон», проспект Тореза, 68 лит. Р, Санкт-Петербург, 194223, Россия.
E-mail: r.avvakumov@niielectron.ru

Чельшков Сергей Николаевич – студент кафедры микро- и нанoeлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ», инженер 3 кат. АО «ЦНИИ «Электрон», проспект Тореза, 68 лит. Р, Санкт-Петербург, 194223, Россия.
E-mail: s.chelyshkov@niielectron.ru

Зубков Василий Иванович – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры микро- и нанoeлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: vizubkov@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6830-6899>

Мошников Вячеслав Алексеевич – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры микро- и нанoeлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: vamoshnirov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6500-5492>

Вклад авторов:

Егоренков А. А. – подготовка текста статьи, математическое описание.
Мазинг Д. С. – обзор технических решений, подготовка текста статьи.
Аввакумов Р. А. – подбор литературы, разработка моделей в SimWin.
Чельшков С. Н. – исследование моделей, подготовка текста статьи.
Зубков В. И. – анализ математических моделей, выводы.
Мошников В. А. – введение и постановка задачи.

References

1. Colloidal HgTe nanocrystals with widely tunable narrow band gap energies: from telecommunications to molecular vibrations / M. V. Kovalenko, E. Kaufmann, D. Pachinger, J. Roither, M. Huber, J. Stangl, G. Hesser, F. Schaffler, W. Heiss // *J. Am. Chem. Soc.* 2006. Vol. 128, no. 11. P. 3516–3517. doi: 10.1021/ja058440j.
2. Ajnbund M. R., Mironov D. E., Zubkov V. I. Gibridnye fotojelektronnye pribory (obzor) // *Uspehi prikladnoj fiziki*, 2018. Т. 6, № 5. S. 401–408. (In Russ.).
3. Air-stable all-inorganic nanocrystal solar cells processed from solution / I. Gur, N. A. Fromer, M. L. Geier, A. P. Alivisatos // *Sci.* 2005. Vol. 310, no. 5747. P. 462–465. doi: 10.1126/science.1117908.
4. Rogalski A., Antoszewski J., Faraone L. Third-generation infrared photodetector arrays // *J. Appl. Phys.* 2009. Vol. 105, no. 9. P. 091101. doi: 10.1063/1.3099572.
5. Pat. №US005646437A. Indium antimonide (InSb) photodetector device and structure for infrared, visible and ultraviolet radiation / I. Kasai, J. R. Toman; from 02.06.1994; publ. 08.07.1994. 5 p.
6. Rogalski A. HgCdTe photodetectors // *Mid-infrared optoelectronics*. 2020. P. 235–335. doi: 10.1016/B978-0-08-102709-7.00007-3.
7. Kaniewski J., Piotrowski J. InGaAs for infrared photodetectors. *Physics and technology. Opto-Electronics Review*. 2004. Vol. 12(1). P. 139–148.
8. InAs on GaAs photodetectors using thin InAlAs graded buffers and their application to exceeding short-wave infrared imaging at 300 K / S. S. Kang, D. M. Geum, K. Kwak, J. H. Kang, C. H. Shim, H. Y. Hyun, S. H. Kim, W. J. Choi, S. H. Choi, M. C. Park, J. D. Song // *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9(1). P. 12875. (1–8). doi: 10.1038/s41598-019-49300-z.
9. Luminescent colloidal InSb quantum dots from in situ generated single-source precursor / S. Busatto, M. de Ruiter, J. T. Jastrzebski, W. Albrecht, V. Pinchetti, S. Brovelli, S. Bals, M. E. Moret, C. de Mello Donega // *ACS Nano*. 2020. Vol. 14, no. 10. P. 13146–13160. doi: 10.1021/acsnano.0c04744.
10. Colloidal InSb quantum dots for 1500 nm SWIR photodetector with antioxidation of surface / H. Seo, H. J. Eun, A. Y. Lee, H. K. Lee, J. H. Kim, S. W. Kim // *Advanced Sci.* 2023. Vol. 11, no. 4. P. 2306439. doi: 10.1002/advs.202306439.
11. Fast near-infrared photodetection using III–V colloidal quantum dots / B. Sun, A. M. Najarian, L. K. Sagar, M. Biondi, M. J. Choi, X. Li, L. Levina, S. W. Baek, C. Zheng, S. Lee, A. R. Kirmani, R. Sabatini, J. Abed, M. Liu, M. Vafaie, P. Li, L. J. Richter, O. Voznyy, M. Chekini, Z. H. Lu, F. P. G. de Arquer, E. H. Sargent // *Advanced Materials*. 2022. Vol. 34, no. 33. P. 2203039. doi: 10.1002/adma.202203039.
12. Room temperature synthesis of self-doped silver selenide quantum dots sensitive to mid-infrared light / M. N. An, S. Y. Eom, J. H. Lee, H. Song, M. Cho, K. S. Jeong // *ACS Appl. Nano Materials*. 2023. Vol. 6, no. 23. P. 22488–22495. doi: 10.1021/acsnm.3c05043.
13. Silver selenide colloidal quantum dots for mid-wavelength infrared photodetection / S. B. Hafiz, M. R. Scimeca, P. Zhao, I. J. Paredes, A. Sahu, D. K. Ko //

ACS Appl. Nano Materials. 2019. Vol. 2, no. 3. P. 1631–1636. doi: 10.1021/acsnm.9b00069.

14. Colloidal quantum dot based infrared detectors: extending to the mid-infrared and moving from the lab to the field / T. Nakotte, S. G. Munyan, J. W. Murphy, S. A. Hawks, S. Kang, J. Han, A. M. Hiszpanski // J. of Materials Chem. C. 2022. Vol. 10, no. 3. P. 790–804. doi: 10.1039/D1TC05359K.

15. Intraband mid-infrared transitions in Ag₂Se nanocrystals: potential and limitations for Hg-free low-cost photodetection / J. Qu, N. Goubet, C. Livache, B. Martinez, Amelot D., Greboval C., Chu A., Ramade J., Cruguel H., S. Ithurria, M. G. Silly, E. Lhuillier // The J. of Phys. Chem. C. 2018. Vol. 122, no. 31. P. 18161–18167. doi: 10.1021/acs.jpcc.8b05699.

16. Silver telluride colloidal quantum dot infrared photodetectors and image sensors / Y. Wang, L. Peng, J. Schreier, Y. Bi, A. Black, A. Malla, S. Goossens, G. Konstantatos // Nature Photonics. 2024. Vol. 18, no. 3. P. 1–7. doi: 10.1038/s41566-023-01345-3.

17. Long-wavelength lead sulfide quantum dots sensing up to 2600 nm for short-wavelength infrared photodetectors / C. Dong, S. Liu, N. Barange, J. Lee, T. Pardue, X. Yi, S. Yin, F. So // ACS Appl. Materials & Interfaces. 2019. Vol. 11, no. 47. P. 44451–44457. doi:10.1021/acsmi.9b16539.

18. Hybrid photovoltaics based on semiconductor nanocrystals and amorphous silicon / B. Sun, A. T. Findikoglu, M. Sykora, D. J. Werder, V. I. Klimov // Nano Lett. 2009. Vol. 9, no. 3. P. 1235–1241. doi: 10.1021/nl9001469.

19. Efficient light harvesting and carrier transport in PbS quantum dots-silicon nanotips heterojunctions / C. Y. Huang, D. Y. Wang, C. H. Wang, Y. T. Wang, Y. T. Jiang,

Y. J. Yang, C. C. Chen, Y. F. Chen // J. Phys. D: Appl. Phys. 2011. Vol. 44, no. 8. P. 085103. doi:10.1088/0022-3727/44/8/085103.

20. Efficient light harvesting by photon down-conversion and light trapping in hybrid ZnS nanoparticles/Si nanotips solar cells / C. Y. Huang, D. Y. Wang, C. H. Wang, Y. T. Chen, Y. T. Wang, Y. T. Jiang, Y. J. Yang, C. C. Chen, Y. F. Chen // ACS Nano. 2010. Vol. 4, no. 10. P. 5849–5854. doi: 10.1021/nn101817s.

21. The silicon: Colloidal quantum dot heterojunction / S. Masala, V. Adinolfi, J. P. Sun, S. D. Gobbo, O. Voznyy, I. J. Kramer, I. G. Hill, E. H. Sargent // Advanced Materials. 2015. Vol. 27, no. 45. P. 7445–7450. doi: 10.1002/adma.201503212.

22. Inverted Si:PbS colloidal quantum dots heterojunction-based infrared photodetector / K. Xu, X. Xiao, W. Zhou, X. Jiang, Q. Wei, H. Chen, Z. Deng, J. Huang, B. Chen, Z. Ning // ACS Appl. Materials & Interfaces. 2020. Vol. 12, no. 13. P. 15414–15421. doi: 10.1021/acsmi.0c01744.

23. High quality silicon: Colloidal quantum dot heterojunction based infrared photodetector / X. Xiao, K. Xu, M. Yin, Y. Qiu, W. Zhou, L. Zheng, X. Cheng, Y. Yu, Z. Ning // Appl. Phys. Lett. 2020. Vol. 116, no. 10. P. 101102. doi:10.1063/1.5140255.

24. Silicon surface passivation for silicon-colloidal quantum dot heterojunction photodetectors / Q. Xu, I. T. Cheong, L. Meng, J. G. C. Veinot, X. Wang // ACS Nano. 2021. Vol. 15, no. 11. P. 18429–18436. doi: 10.1021/acsnano.1c08002.

25. Burstein E., Perkkowitz S., Brodsky M. H. The dielectric properties of the cubic IV-VI compound semiconductors // J. Phys. Colloques. 1968. Vol. 29, no. C4. P. 78–83. doi: 10.1051/jphyscol:1968411.

Information about the authors

Artem A. Egorenkov – graduate student of the Department of Micro- and Nanoelectronics, Saint Petersburg Electrotechnical University, Head of the Department at JSC «NRI Electron», Toreza Av., 68, build. R, Saint Petersburg, 194223, Russia.

E-mail: a.egorenkov@niielectron.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0084-564X>

Dmitriy S. Mazing – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Micro- and Nanoelectronics, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: dmazing@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3601-9208>

Roman A. Avvakumov – student of the Department of Micro- and Nanoelectronics, Saint Petersburg Electrotechnical University, Engineer 3rd cat. of JSC «NRI Electron», Toreza Av., 68, build. R, Saint Petersburg, 194223, Russia.

E-mail: r.avvakumov@niielectron.ru

Sergey N. Chelyshkov – student of the Department of Micro- and Nanoelectronics, Saint Petersburg Electrotechnical University, Engineer 3rd cat. of JSC «NRI Electron», Toreza Av., 68, build. R, Saint Petersburg, 194223, Russia.

E-mail: s.chelyshkov@niielectron.ru

Vasily I. Zubkov – Dr Sci. (Phys. and Math.), Professor of the Department of Micro- and Nanoelectronics, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: vizubkov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6830-6899>

Vyacheslav A. Moshnikov – Dr Sci. (Phys. and Math.), Professor of the Department of Micro- and Nanoelectronics, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: vamoshnirov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6500-5492>

Author contribution statement:

Egorenkov A. A. – preparation of article text, mathematical description.

Mazing D. S. – review of technical solutions, preparation of article text.

Avvakumov R. A. – literature review, development of models in SimWin.

Chelyshkov S. N. – model investigation, preparation of article text.

Zubkov V. I. – analysis of mathematical models, conclusions.

Moshnikov V. A. – introduction and problem statement.

Статья поступила в редакцию 11.04.2024; принята к публикации после рецензирования 25.04.2024; опубликована онлайн 21.06.2024.

Submitted 11.04.2024; accepted 25.04.2024; published online 21.06.2024.
