

УДК 621
EDN: LNYBJQ

PACS: 85.60.–g

Получение чернил из коллоидных нанокристаллов AgInS_2 и микроплоттерная печать фоточувствительных структур на их основе

© И. А. Шуклов*, В. В. Лим, И. С. Власов, М. А. Троянова, А. Ю. Шалагин,
О. В. Вершинина, В. О. Яковлев, В. С. Попов, В. В. Иванов

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
г. Долгопрудный, Московская область, 141701 Россия

* E-mail: shuklov.ia@mipt.ru

Статья поступила в редакцию 10.12.2025; после доработки 14.01.2026; принята к публикации 27.04.2026
Шифр научной специальности: 1.3.11

Впервые на основе коллоидных нанокристаллов AgInS_2 с помощью замены лигандов в растворе были получены чернила, пригодные для изготовления фоточувствительных структур. В рамках исследования была подобрана система стабилизирующих лигандов, с которыми полученный золь в диметилформамиде сохранял стабильность в течении двух недель без существенной агломерации. ИК-Фурье спектроскопия подтвердила полноту замены лигандов. С помощью микроплоттера на основе полученных коллоидных материалов на золотых встречно-штыревых электродах была получена фоточувствительная структура фоторезистивного типа, для которой измерены фотоэлектрические характеристики при засвечивании лазером 405 нм.

Ключевые слова: серебра индия сульфид, высокотемпературный коллоидный синтез, нанокристаллы, квантовые точки, тонкие пленки.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-2-19-27

Введение

Коллоидные квантовые точки представляют собой новый класс наноматериалов с возможностью модификации оптических свойств посредством модификации размеров полупроводниковых наночастиц [1, 2]. Синтез коллоидных нанокристаллов, как правило, осуществляется методом высокотемпературного коллоидного синтеза с использованием длинноцепочечных сурфактантов, которые выступают в качестве лигандов и стабилизаторов образующихся наночастиц. Эти органические лиганды позволяют получить нанокристаллы с узким распределением по размерам и малодефектной поверхностью. Кроме того, они обеспечивают длительную седиментационную стабильность получаемых золь. К сожалению, эти же длинноцепочечные лиганды выступают в качестве изоляторов и не позво-

ляют получить тонкие слои коллоидных нанокристаллов с хорошей проводимостью. Поэтому для создания тонких фоточувствительных проводящих пленок на основе ККТ, как правило, используется метод послойного нанесения с послойной заменой лигандов. Замена длинноцепочечных лигандов на короткоцепочечные уже в пленках позволяет обеспечить проводимость с сохранением индивидуальности наносимых наночастиц. Таким образом, могут быть получены как фоторезисторы, так и более сложные многослойные структуры типа фотодиодов. Слабым местом данного метода является сложность получения относительно толстых пленок, т. к. скорость замены лигандов в пленке стремительно падает с ростом толщины пленок. Также многие реакции замены в процессе гетерофазной реакции не позволяют получить высокий процент замены исходных лигандов даже в тон-

ких пленках толщиной в монослой нанокристаллов, т. е. 5–10 нм [3, 4]. В последние годы в качестве альтернативного подхода для получения проводящих пленок на основе коллоидных нанокристаллов предлагается замена длинноцепочечных лигандов еще в растворе с получением относительно стабильных коллоидных растворов нанокристаллов с короткоцепочечными лигандами [5]. В этих коллоидах, как правило, седиментационная стабильность обеспечивается электростатической стабилизацией [6]. Коллоидные растворы подобного типа позволяют создавать тонкие пленки, обладающие фоточувствительностью и проводимостью напрямую, без дополнительного проведения замены лигандов в пленках. Нанесение может осуществляться спин-коатингом, либо методами аэрозольной печати. С точки зрения получения фоточувствительных структур печать является наиболее привлекательным методом, так как она позволяет уменьшить расход наноматериала и наносить его прицельно на выбранные места [7].

Мониторы и телевизоры, изготовленные по технологии QLED, сегодня широко представлены в сетевых супермаркетах электроники. Квантовые коллоидные точки (ККТ) CdSe, используемые в технологии QLED в качестве люминофорных материалов, синтезируются по хорошо отработанным и воспроизводимым методикам. Однако, несмотря на технологические преимущества, данная система имеет серьезный недостаток – экологическую проблематичность соединений кадмия. Использование кадмия не только создаёт дополнительные требования к производственной безопасности, но и повышает риск загрязнения окружающей среды при повреждении, утилизации или неправильной переработке устройств, содержащих такие люминофоры. Именно этот фактор является одним из важных сдерживающих факторов для распространения солнечных батарей на основе нанокристаллов халькогенидов кадмия. Эти экологические ограничения стимулируют поиск альтернативных материалов и развитие более безопасных технологий [8, 9].

Коллоидные нанокристаллы тройных халькогенидов типа ABX_2 представляют собой перспективный класс полупроводниковых наноматериалов для приложений в солнечных батареях, гибких дисплеях и фотосенсорах

[10]. $AgInS_2$ обладает шириной запрещенной зоны, оцениваемой в 1,87 эВ, для объемного материала и радиусом экситона Бора 5,5 нм. Таким образом, как наноматериал он представляет интерес как возможная альтернатива CdSe.

Проводящие тонкие пленки на основе нанокристаллов $AgInS_2$ получали рядом методов, включая метод послойного нанесения с заменой на меркаптопропионовую кислоту [11]. Прямые методы нанесения зольей $AgInS_2$ слабо исследованы и мало пригодны для создания фоточувствительных структур. Ранее опубликованное исследование с созданием ячейки солнечной батареи на основании коллоидного раствора $AgInS_2$, обозначенном авторами как чернила, включает также прогрев полученных пленок при 450 °C в атмосфере элементарной серы [12]. К тому же, в качестве метода нанесения был использован дроп-кастинг, а не какой либо тип печати. Недавно опубликовано создание чернил на основе нанокристаллов $AgInS_2$ с оболочкой ZnS для создания люминесцентных меток [13]. Данная система содержит стабилизирующие длинноцепочечные лиганды, а также полиметилметакрилат, что исключает применения в создании сенсорных или фоточувствительных структур.

В литературе на данный момент нам не удалось найти примеров получения чернил, т. е. зольей коллоидных квантовых точек $AgInS_2$ с лигандами, позволяющими создавать тонкие пленки с хорошей проводимостью. Подобные «чернила» разработаны для ряда нанокристаллов бинарных халькогенидов, таких как PbS [14, 15], CdSe [16], PbSe [17] и HgTe [18]. В рамках представленной работы впервые была найдена система, пригодная для получения «чернил» на основе $AgInS_2$, а также были изготовлены фоточувствительные элементы резистивного типа с помощью микроплоттера.

Материалы и методы

Реактивы

Следующие химикаты были использованы в синтезе ККТ $AgInS_2$ без дополнительной очистки: йодид индия (99 %, Ланхит), сера (99,99999 %, реакхим), децен-1 (90 %, Вектон), додекантиол-1 (Acros, 99 %), меркаптоэтанол

(95 %, Вектон), *n*-бутиламин (95 %, Вектон), нитрат серебра (хч, Вектон), гексан (99 % HPLC grade, MacronFineChemicals), декан (осч, компонент-реактив), олеиновая кислота (90 %, Вектон), олеиламин (80–90 %, Acros), который был высушен нагревом (100 °С) при пониженном давлении (1 мбар). Стеарат индия был получен по литературной методике из металлического индия [19]. Стеарат серебра был получен из нитрата серебра [20].

Методы измерений

Для исследования размеров, морфологии и структуры наночастиц использовался просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ) JEM-2100 производства компании JEOL (Япония) с ускоряющим напряжением 200 кВ. Анализ кристаллической структуры проводился путем сопоставления межплоскостных расстояний, измеренных по полученным SAED-изображениям, со значениями из базы данных для кристаллических структур. Оптические свойства оценивались методами спектрофотометрии с помощью спектрофотометра (JASCO V-770, JASCO) и методом спектрометрии на ИК Фурье спектрометре (Spectrum 100, PerkinElmer) с приставкой многократного нарушенного полного внутреннего отражения (МНПВО), оснащённой призмами из Ge и ZnSe (угол падения 45°, число отражений 25), источник-измеритель Keithley 4200A-SCS, лазер 405 нм. С помощью атомно-силового микроскопа NT-MDT Solver-PRO в полуконтактном режиме была исследована морфология поверхности тонких пленок.

Получение прекурсора серы

15,625 ммоль (0,5 г) элементарной серы растворили в 10 мл децена-1 при температуре 185 °С и повышенном давлении в завинчивающейся толстостенной пробирке в течение 1 часа. Полученный темно-желтый раствор использовался в качестве прекурсора серы в синтезе нанокристаллов.

Методика синтеза ККТ AgInS₂

Нитрат серебра (10,2 мг, 0,06 ммоль) и стеарат индия (57,9 мг, 0,06 ммоль) добавили в смесь 0,4 мл олеиновой кислоты, 0,3 мл децена-1 и 3 мл декана. Полученную смесь нагревали в токе аргона при 110 °С до образования гомогенного раствора. Полученный раствор разбавили 27 мл декана и нагрели до

150 °С. Раствор серы в децена-1 (1,56 М, 1,5 мл) впрыскивается при 150 °С. Реакционная смесь приобретает коричневую окраску в течение реакции, температура поддерживается на уровне 150 °С. Через 60 мин колба погружается в ледяную баню. Наночастицы AgInS₂ выделяются при помощи двукратного переосаждения. Выделение и очистка ККТ осуществлялись посредством добавления смеси метанол:изопропанол 1:2 с последующим центрифугированием и редиспергированием в *n*-гексане (1,5 мл спиртовой смеси на 2,5 мл реакционной смеси при первом осаждении, 0,6 мл спиртовой смеси на 1 мл ККТ в *n*-гексане при втором осаждении). Нанокристаллы редиспергировали в *n*-гексане.

Методика изготовления чернил ККТ AgInS₂

Ацетат натрия (8,2 мг, 0,1 ммоль) добавили к раствору иодида индия в диметилформамиде (0,1 М, 2 мл) под аргоном и растворили при перемешивании. В полученный раствор добавили 0,2 мл 2-меркаптоэтанола с образованием гомогенного раствора. Данный раствор смешали с золей ККТ AgInS₂ в *n*-октане, при этом наблюдается граница раздела гидрофильной и гидрофобной фаз. Полученную смесь перемешивали в течение 20 минут, по прошествии которых ККТ AgInS₂ перешли из гидрофобной фазы в гидрофильную. ККТ с гидрофильной лигандной оболочкой выделили центрифугированием смеси в течение 10 минут при 3000 об/мин в виде темного осадка. Образовавшийся мелкокристаллический осадок редиспергировали в 2 мл ДМФ с добавлением 0,2 мл бутиламина. Далее продукт выделяется при помощи однократного переосаждения посредством добавления тетрагидроэтанола (3 мл ТХЭ на 1 мл золя в ДМФ) с последующим центрифугированием и редиспергированием в ДМФ.

Методика изготовления фоторезистора на основе чернил ККТ AgInS₂ методом дроп-кастинга

На предварительно очищенную от резиста с помощью горячего (90 °С) *n*-метилпирролидона и промытую в кипящем изопропанолу подложку капнули 50 мкл раствора ККТ AgInS₂ в диметилформамиде. Для более полного испарения ДМФ подложку поместили на плитку при температуре 70 °С.

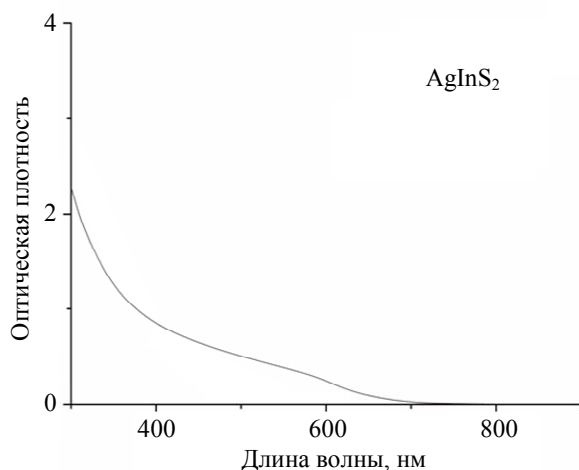
Результаты и обсуждение

В качестве возможных прекурсоров для чернил на основе наночастиц AgInS_2 были выбраны коллоидные нанокристаллы, полученные с прекурсором серы на основе децена-1 [21].

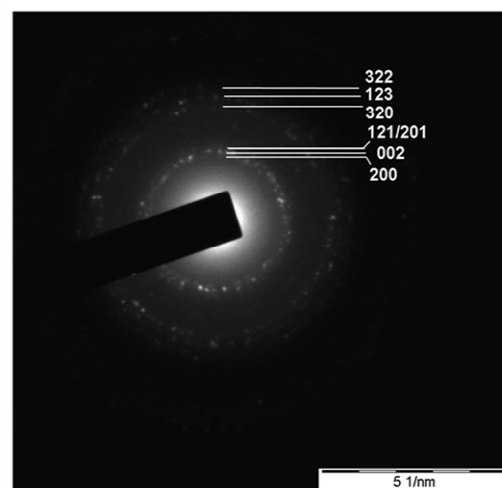
Синтез коллоидных наночастиц AgInS_2 осуществлялся по модифицированной методике, разработанной ранее. Вместо стеарата серебра в качестве прекурсора серебра использовался AgNO_3 [22]. Синтез осуществлялся при 150°C в декане в качестве растворителя. Данная методика позволяет получать нанокристаллы с лигандной оболочкой, состоящей из олеиновой кислоты и олеиламина, что поз-

воляет осуществлять замену исходной оболочки на разные типы короткоцепочечных лигандов. Полученные нанокристаллы обладают кристаллической структурой халькопирита и поглощением в видимом диапазоне (рис. 1). Используемый наноматериал AgInS_2 обладает краем поглощения в 700 нм и максимумом экситонного пика около 580 нм .

Микрофотографии ПЭМ показали, что нанокристаллы обладают формой прямоугольников и прямоугольников с выростами на одной грани и средним размером порядка 16 нм (рис. 2а–б). Анализ гистограмм распределения по размерам показал, что распределение достаточно узкое со среднеквадратичным отклонением равным $3,98$.

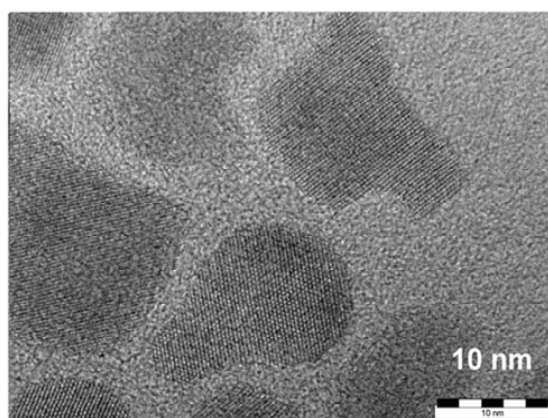


а)

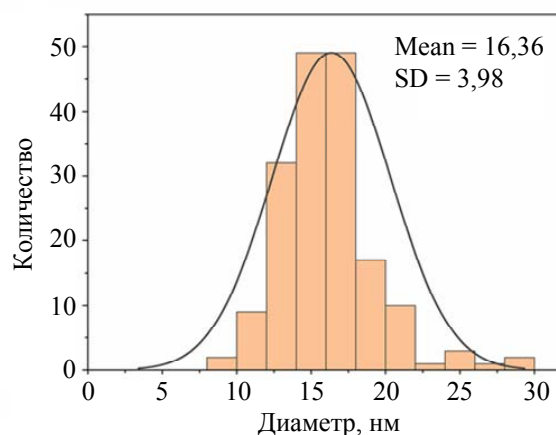


б)

Рис. 1. ККТ AgInS_2 а) Спектр поглощения (видимый диапазон, $300\text{--}700\text{ нм}$); б) SAED-изображение



а)



б)

Рис. 2. а) ПЭМ-изображение и б) распределение по размерам ККТ AgInS_2

Для изготовления чернил из нанокристаллов бинарных халькогенидов таких, как PbS, CdSe или HgTe, обычно проводится замена исходной лигандной оболочки в диметилформамиде на галогенид соответствующего металла и бутиламин. Замещение обычно проводится в двухфазной системе и об эффективности замещения можно судить по перемещению наночастиц из одной фазы в другую с изменением их цвета. Для гидрофобной фазы это изменение окраски с черного на бесцветный и для гидрофильной диметилформамидной с бесцветного на окрашенный.

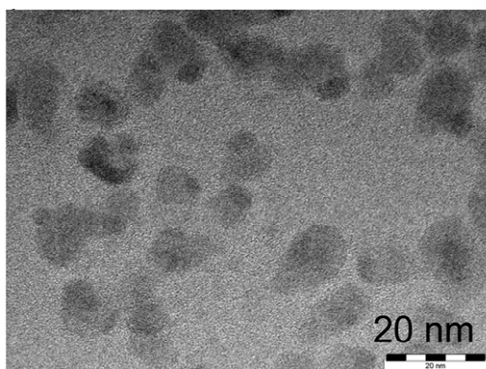
Как уже было упомянуто, изготовление чернил на основе коллоидных нанокристаллов AgInS₂ не описано в литературе. В данном случае по аналогии можно использовать либо галогениды серебра или галогениды индия, либо смесь обоих солей металлов. Первичные опыты показали, что использование галогенидов серебра или смесей с ними для проведения замены затруднительно в силу их крайне низкой растворимости. Таким образом, для оптимизации были выбраны системы на основе галогенидов индия. Замещение исходной лигандной оболочки со сменой фазы наблюдалось при использовании йодида индия для исследованных нанокристаллов с карбоксилатной оболочкой. При этом полученные коллоидные растворы обладали очень низкой стабильностью и практически моментально разрушались с выделением наночастиц AgInS₂, которые было невозможно снова перевести в золь.

Для использования золь нанокристаллов в качестве чернил ключевым фактором является седиментационная стабильность.

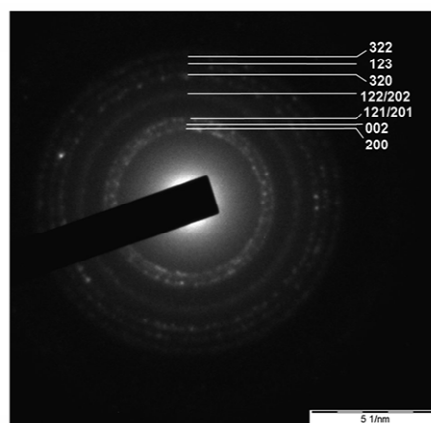
Авторы добились долгосрочной коллоидной стабильности при использовании комбинации бутиламина и меркаптоэтанола на основе нанокристаллов AgInS₂. При этом полученные золи AgInS₂ в ДМФ не разрушались под действием толуола, так как это описано для аналогичных золь, что затрудняло их очистку и выделение. Использование тетрахлорэтилена в качестве высаживающего реагента решило эту проблему.

Исследование с помощью ПЭМ показало, что нанокристаллы после замещения сохраняют размер, близкий к исходному, при этом приобретая более сферическую форму. SAED показал сохранение кристаллической структуры халькопирита AgInS₂. При этом кристалличность образца повышается, кроме того, относительная интенсивность рефлекса от плоскости 122/202 увеличивается.

Сравнительное исследование пленок, получаемых из исходных коллоидных нанокристаллов AgInS₂ и «чернил» AgInS₂ в диметилформамиде, показали, что сигналы исходной оболочки, состоящей из длинноцепочечных карбоксилатных лигандов, исчезают. Так, интенсивность сигналов валентных колебаний метиленовых групп при 2950 см⁻¹ в результате замещения олеата на бутиламин падает в 5 раз, а сигнал карбоксилат-иона при 1585 см⁻¹ полностью исчезает. При этом появляется сигнал карбонильной группы координированного на поверхности нанокристаллов диметилформамида при 1661 см⁻¹. Также в ИК-области появляется широкий пик с максимумом на 4050 см⁻¹, связанный с внутрizonным переходом.



а)



б)

Рис. 3. «Чернила» ККТ AgInS₂ а) ПЭМ-изображение и б) SAED

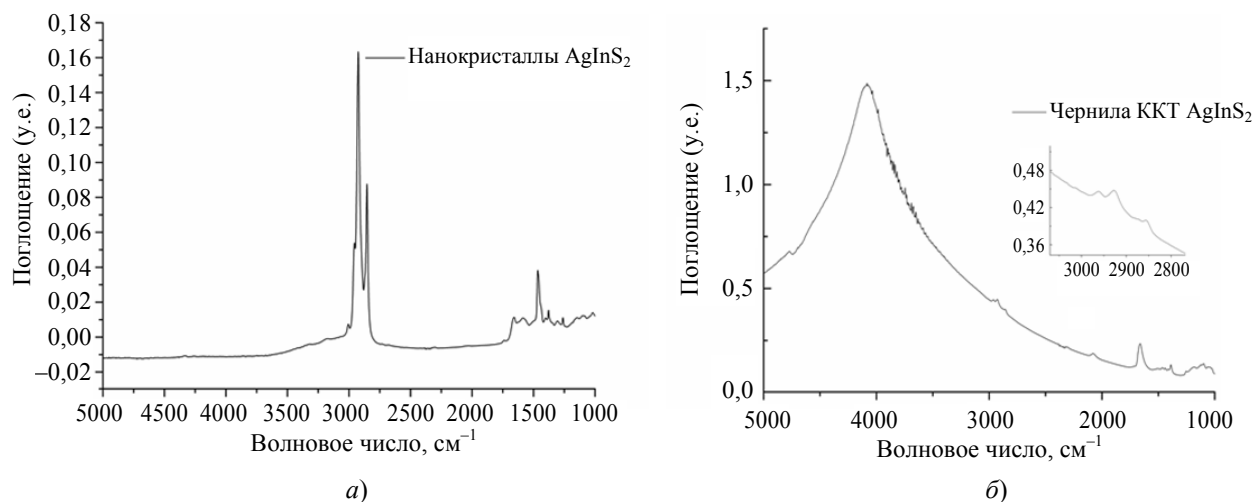


Рис. 4. а) Спектры ИК в диапазоне $5000\text{--}1000\text{ см}^{-1}$; ККТ наночастиц AgInS_2 до замены лигандов в растворе и после замены лигандов

Процесс формирования тонкоплёночных функциональных проводящих микроструктур выполнялся при помощи микроплоттера SonoPlot GIX Microplotter II (SonoPlot, Middleton, USA). Микроплоттер позволяет использовать пиколитры жидкости для осаждения функциональных элементов с плоскостными размерами до 5 мкм. Нанесение происходит с помощью технологии выброса жидкости из сопла, использующей ультразвуковую вибрацию, которая возникает благодаря пьезоэлектрическому элементу. При этом точность позиционирования капилляра достигает 5 мкм. В работе на микроплоттере может быть использован широкий диапазон жидкостей: вязкость функциональных чернил может достигать 450 сП, что в значительной степени превышает подобные характеристики при использовании струйных принтеров, работающих по принципу drop-on-demand. Формирование элементов производилось с использованием чернил на основе ККТ на подложках из оксида кремния с толщиной окисла 260 нм и заранее изготовленными методом литографии золотыми электродами. Было изготовлено два типа подложек со следующими типами электродов: встречно-штыревые с расстоянием между электродами 2, 3 и 5 мкм и «рогатки» с расстоянием между электродами 30, 20 и 10 мкм.

Для печати был выбран стеклянный капилляр с диаметром сопла около 400 мкм. Перед печатью капилляр заправлялся чернилами и опускался на расстояния в 5–10 мкм до подложки, и на пьезоэлектрический элемент подавалось управляющее напряжение в 10 В для формирования контакта между чернилами и подложкой, после чего управляющее напряжение уменьшалось до 1 В. В процессе печати капилляр перемещался со скоростью 10 мм/с, а управляющее напряжение, подаваемое на пьезо-электрический элемент, оставалось неизменным. Печать производилась в 1 и 2 слоя для встречно-штыревых электродов, и в 1, 2 и 4 слоя для электродов в форме «рогаток». После печати образцы сушились при комнатной температуре.

Исследование поверхности с помощью АСМ показала высокую степень однородности поверхности полученных образцов тонких плёнок (рис. 5).

Полученные образцы фоторезисторов показали увеличение проводимости под действием монохроматического излучения с длиной волны 405 нм. Наибольшее значение фототока при удельной мощности падающего излучения 0,9 мВт/мм составило 0,18 пА, при темновом токе 0,01 пА (рис. 6), что обеспечивает чувствительность 0,03 мкА/Вт.

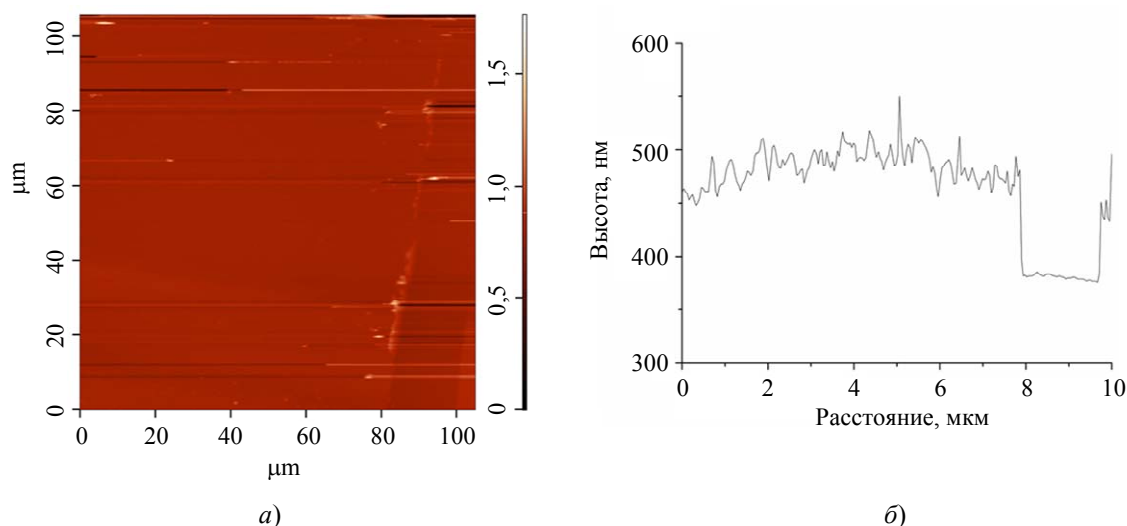


Рис. 5. Изображение поверхности и профиль среза пленки, полученный нанесением чернил ККТ $AgInS_2$

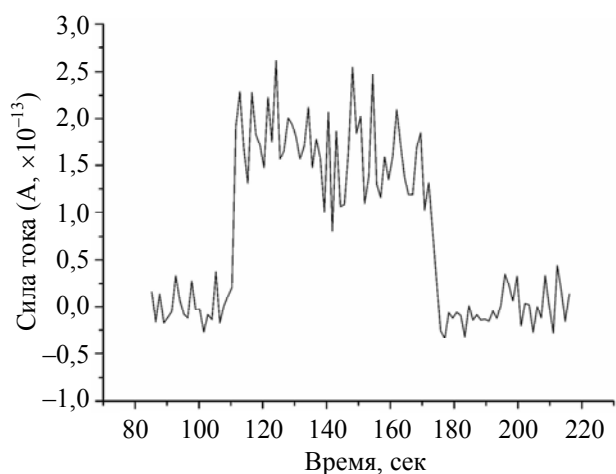


Рис. 6. Характерный вид зависимости тока от времени при включении и выключении засветки от источника 405 нм

Выводы

Впервые на основе коллоидных нанокристаллов $AgInS_2$ были получены чернила для прямой печати фоточувствительных структур. Для этого была разработана новая замена длинноцепочечных лигандов на короткоцепочечные в растворе для наночастиц $AgInS_2$. Было установлено, что наночастицы $AgInS_2$ с таким типом лигандной оболочки более подходят для замены лигандов с созданием чернил. Нами было установлено, что карбоксилатная лигандная оболочка позволяет эффективно и полно проводить требуемую замену лигандов для создания чернил. Полученные чернила были нанесены с помощью микроплоттера на встречно-штыревые электроды,

в результате чего была изготовлена фоточувствительная структура фоторезистивного типа, показавшая фототклик при воздействии монохроматического излучения с длиной 405 нм.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-03-2025-662 от 17.01.2025 г. (проект № FSMG-2024-0009).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ponomarenko V. P., Popov V. S., Shuklov I. A., Ivanov V. V., Razumov V. F. / Russ. Chem. Rev. 2024. Vol. 93. № 4. P. RCR5113.
2. Shuklov I. A., Razumov V. F. / Russ. Chem. Rev. 2020. Vol. 89. № 3. P. 379.
3. Liu M., Tang G., Liu Y., Jiang F.-L. / The Journal of Physical Chemistry Letters. 2024. Vol. 15. № 7. P. 1975–1984.
4. Shuklov I. A., Dyomkin D. V., Milenkovich T., Dubrovina N. V., Vershinina O. V., Ivanov V. V., Razumov V. F. / Nanoscience and Technology: An International Journal. 2025. Vol. 16. № 4.
5. Aqoma H., Jang S.-Y. / Energy Environ. Sci. 2018. Vol. 11 (6). P. 1603–1609.
6. Zheng S., Chen J., Johansson E. M. J., Zhang X. / iScience. 2020. Vol. 23. № 11.
7. Xiang C., Wu L., Lu Z., Li M., Wen Y., Yang Y., Liu W., Zhang T., Cao W., Tsang S.-W., Shan B., Yan X., Qian L. / Nature Communications. 2020. Vol. 11. № 1. P. 1646.
8. Chakraborty D., Ethiraj K. R., Chandrasekaran N., Mukherjee A. / Environmental Pollution. 2021. Vol. 270. P. 116049.

9. Sharma V. K., McDonald T. J., Sohn M., Anquandah G. A. K., Pettine M., Zboril R. / *Chemosphere*. 2017. Vol. 188. P. 403–413.
10. Liu Y., Gao Y., Yang Q., Xu G., Zhou X., Shi G., Lyu X., Wu H., Liu J., Fang S. / *Angewandte Chemie International Edition*. 2023. Vol. 62. P. e202300396.
11. Cai C., Zhai L., Ma Y., Zou C., Zhang L., Yang Y., Huang S. / *Journal of Power Sources*. 2017. Vol. 341. P. 11–18.
12. Peng S., Zhang S., Mhaisalkar S. G., Ramakrishna S. / *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2012. Vol. 14. № 24. P. 8523–8529.
13. Kumar P., Jin L., Selopal G. S., Abdelkarim O., Liu J., Barba D., Yurtsever A., Wang Z. M., Rosei F. / *Nano Materials Science*. 2024. In press. <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2024.10.005>.
14. Wang H., Pinna J., Romero D. G., Di Mario L., Koushki R. M., Kot M., Portale G., Loi M. A. / *Advanced Materials*. 2024. Vol. 36. P. 2311526.
15. Yuan M., Hu H., Wang Y., Xia H., Zhang X., Wang B., He Z., Yu M., Tan Y., Shi Z., et al. / *Small*. 2022. Vol. 18. P. 2205356. <https://doi.org/10.1002/sml.202205356>.
16. Tang H., Jia S., Ding S., Liu P., Ma J., Xiao X., Qu X., Liu H., Yang H., Xu B., et al. / *ACS Applied Electronic Materials*. 2021. Vol. 3. P. 3005–3014. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.1c00210>.
17. Yuan M., Hu H., Wang Y., Xia H., Zhang X., Wang B., He Z., Yu M., Tan Y., Shi Z. / *Small*. 2022. Vol. 18. № 48. P. 2205356.
18. Martinez B., Ramade J., Livache C., Goubet N., Chu A., Gréboval C., Qu J., Watkins W. L., Becerra L., Dandeu E., et al. / *Advanced Optical Materials*. 2019. Vol. 7. P. 1900348. <https://doi.org/10.1002/adom.201900348>.
19. Dou Q., Ng K. M. / *Powder Technology*. 2016. Vol. 301. P. 949–958.
20. Malik W. U., Jain A. K., Jhamb O. P. / *Journal of the Chemical Society A: Inorganic, Physical, Theoretical*. 1971. № 0. P. 1514–1517.
21. Shuklov I. A., Seraya A. V., Shalagin A. Y., Lim V. V., Milenkovich T., Vershinina O. V., Ivanov V. V. / *Applied Physics*. 2025. № 2. P. 21.
22. Shuklov I. A., Milenkovich T., Majorova A. V., Vershinina O. V., Ivanova V. A., Pavlova V. D., Popov V. S. / *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2025. Vol. 70. № 2. P. 61.

PACS: 85.60.–g

Preparation of inks based on colloidal AgInS₂ nanocrystals and their application in microplotter printing of photosensitive structures

I. A. Shuklov*, V. V. Lim, I. S. Vlasov, M. A. Troianova, A. Yu. Shalagin, O. V. Vershinina, V. O. Iakovlev, V. S. Popov, and V. V. Ivanov

Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701 Russia

*E-mail: shuklov.ia@mipt.ru

Received 10.12.2025; revised 14.01.2026; accepted 27.04.2026

For the first time, ligand exchange in solution was used to produce inks based on colloidal AgInS₂ nanocrystals that are suitable for the fabrication of photosensitive structures. Within this study, a system of stabilizing ligands was identified that allowed the resulting sol in dimethylformamide to remain stable for two weeks without significant agglomeration. FTIR spectroscopy confirmed the completeness of the ligand exchange. Using a microplotter, a photosensitive, photoconductive-type structure was fabricated on gold interdigitated electrodes from the obtained colloidal materials, and its photoelectrical characteristics were measured under illumination with a 405 nm laser.

Keywords: silver indium sulfide, hot injection synthesis, nanocrystals, colloidal quantum dots, thin films.

REFERENCES

1. Ponomarenko V. P., Popov V. S., Shuklov I. A., Ivanov V. V., and Razumov V. F., *Russ. Chem. Rev.* **93** (4), RCR5113 (2024).
2. Shuklov I. A. and Razumov V. F., *Russ. Chem. Rev.* **89** (3), 379 (2020).
3. Liu M., Tang G., Liu Y., and Jiang F.-L., *The Journal of Physical Chemistry Letters* **15** (7), 1975–1984 (2024).
4. Shuklov I. A., Dyomkin D. V., Milenkovich T., Dubrovina N. V., Vershinina O. V., Ivanov V. V., and

- Razumov V. F., *Nanoscience and Technology: An International Journal* **16** (4), (2025).
5. Aqoma H. and Jang S.-Y., *Energy Environ. Sci.* **11** (6), 1603–1609 (2018).
 6. Zheng S., Chen J., Johansson E. M. J., and Zhang X., *iScience* **23** (11), (2020).
 7. Xiang C., Wu L., Lu Z., Li M., Wen Y., Yang Y., Liu W., Zhang T., Cao W., Tsang S.-W., Shan B., Yan X., and Qian L., *Nature Communications* **11** (1), 1646 (2020).
 8. Chakraborty D., Ethiraj K. R., Chandrasekaran N., and Mukherjee A., *Environmental Pollution* **270**, 116049 (2021).
 9. Sharma V. K., McDonald T. J., Sohn M., Anquandah G. A. K., Pettine M., and Zboril R., *Chemosphere* **188**, 403–413 (2017).
 10. Liu Y., Gao Y., Yang Q., Xu G., Zhou X., Shi G., Lyu X., Wu H., Liu J., and Fang S., *Angewandte Chemie International Edition* **62**, e202300396 (2023).
 11. Cai C., Zhai L., Ma Y., Zou C., Zhang L., Yang Y., and Huang S., *Journal of Power Sources* **341**, 11–18 (2017).
 12. Peng S., Zhang S., Mhaisalkar S. G., and Ramakrishna S., *Physical Chemistry Chemical Physics* **14** (24), 8523–8529 (2012).
 13. Kumar P., Jin L., Selopal G. S., Abdelkarim O., Liu J., Barba D., Yurtsever A., Wang Z. M., and Rosei F., *Nano Materials Science*, (2024). In press. <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2024.10.005>.
 14. Wang H., Pinna J., Romero D. G., Di Mario L., Koushki R. M., Kot M., Portale G., and Loi M. A., *Advanced Materials* **36**, 2311526 (2024).
 15. Yuan M., Hu H., Wang Y., Xia H., Zhang X., Wang B., He Z., Yu M., Tan Y., Shi Z., et al., *Small* **18**, 2205356 (2022). <https://doi.org/10.1002/sml.202205356>.
 16. Tang H., Jia S., Ding S., Liu P., Ma J., Xiao X., Qu X., Liu H., Yang H., Xu B., et al., *ACS Applied Electronic Materials* **3**, 3005–3014 (2021). <https://doi.org/10.1021/acsaelm.1c00210>.
 17. Yuan M., Hu H., Wang Y., Xia H., Zhang X., Wang B., He Z., Yu M., Tan Y., and Shi Z., *Small* **18** (48), 2205356 (2022).
 18. Martinez B., Ramade J., Livache C., Goubet N., Chu A., Gréboval C., Qu J., Watkins W. L., Becerra L., Dandeu E., et al., *Advanced Optical Materials* **7**, 1900348 (2019). <https://doi.org/10.1002/adom.201900348>.
 19. Dou Q. and Ng K. M., *Powder Technology* **301**, 949–958 (2016).
 20. Malik W. U., Jain A. K., and Jhamb O. P., *Journal of the Chemical Society A: Inorganic, Physical, Theoretical*, № 0, 1514–1517 (1971).
 21. Shuklov I. A., Seraya A. V., Shalagin A. Y., Lim V. V., Milenkovich T., Vershinina O. V., and Ivanov V. V., *Applied Physics*, № 2, 21 (2025).
 22. Shuklov I. A., Milenkovich T., Majorova A. V., Vershinina O. V., Ivanova V. A., Pavlova V. D., and Popov V. S., *Journal of Communications Technology and Electronics* **70** (2), 61 (2025).

Об авторах

Шуклов Иван Алексеевич, старший научный сотрудник, доцент, Dr. rer. nat., Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, г. Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., д. 9). E-mail: shuklov.ia@mipt.ru SPIN-код: 4060-7233, AuthorID: 1146575

Лим Владимир Валерьевич, техник, бакалавр, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, г. Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., д. 9). E-mail: lim.vv@mipt.ru

Власов Иван Сергеевич, младший научный сотрудник, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, г. Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., д. 9). E-mail: vlasov.is@mipt.ru SPIN-код: 7291-5090

Троянова Маргарита Александровна, техник, бакалавр, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, г. Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., д. 9). E-mail: troianova.ma@mipt.ru

Шалагин Александр Юрьевич, техник, бакалавр, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, г. Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., д. 9). E-mail: shalagin.au@mipt.ru SPIN-код: 9769-2552

Вершинина Олеся Валерьевна, младший научный сотрудник, аспирант, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, г. Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., д. 9). E-mail: seraia.ov@phystech.edu

Яковлев Виктор Олегович, младший научный сотрудник, аспирант, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, г. Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., д. 9). E-mail: iakovlev.vo@mipt.ru SPIN-код: 3324-6931

Попов Виктор Сергеевич, заведующий лабораторией, ведущий научный сотрудник, доцент, к.х.н., Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, г. Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., д. 9). E-mail: popov.vs@mipt.ru SPIN-код: 1128-2332, AuthorID: 625948

Иванов Виктор Владимирович, главный научный сотрудник, директор института квантовых технологий, профессор, д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН. Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, г. Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., д. 9). E-mail: ivanov.vv@mirt.ru SPIN-код: 1856-3914, AuthorID: 19128