

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.387

Электрофизические и температурные характеристики

тонких слоёв квантовых точек Ag_2S

Мазинов А.С., Тютюник А.С., Гурченко В.С.

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, <https://cfuv.ru/>

Симферополь 295007, Российская Федерация

E-mail: mazinovas@cfuv.ru, tyutyunikas@mail.ru, gurchenko_v@mail.ru

Поступила 02.05.2024, рецензирована 06.05.2024, принята 09.05.2024

Представлена действительным членом РАЕН С.П. Губиным

Аннотация: В работе представлено исследование электрофизических свойств тонких плёнок коллоидных квантовых точек сульфида серебра ($\text{КТ Ag}_2\text{S/SiO}_2$) и квантовых точек сульфида серебра, декорированных плазмонными наночастицами золота ($\text{КТ Ag}_2\text{S/SiO}_2/\text{Au}$). Проведено исследование температурных зависимостей проводимости в диапазоне температур от 300 до 360 К. Были получены значения энергии активации из линейных аппроксимаций вольт-амперных характеристик в координатах Аррениуса. Показано, что декорирование $\text{КТ Ag}_2\text{S/SiO}_2$ плазмонными наночастицами золота приводит к увеличению ширины запрещенной зоны с 0.29 до 0.89 эВ. В работе рассчитан фактор идеальности и определены основные механизмы проводимости представленных тонкоплёночных структур. Показано, что декорирование $\text{КТ Ag}_2\text{S/SiO}_2$ наночастицами Au приводит к изменению типа проводимости. Согласно модели Мотта-Герни рассчитана подвижности носителей заряда.

Ключевые слова: квантовые точки, сульфид серебра, энергия активации, подвижность носителей заряда

УДК 537.312.6, 538.935, 53.096

Благодарности: Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-22-10007 и региона Крым.

Для цитирования: Мазинов А.С., Тютюник А.С., Гурченко В.С. Электрофизические и температурные характеристики тонких слоёв квантовых точек Ag_2S . РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(3):387-394. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.387.

Electrophysical and temperature characteristics of Ag_2S

quantum dots thin layers

Alim S. Mazinov, Andrey S. Tyutyunik, Vladimir S. Gurchenko

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, <https://cfuv.ru/>

Simferopol 295007, Russian Federation

E-mail: mazinovas@cfuv.ru, tyutyunikas@mail.ru, gurchenko_v@mail.ru

Received May 02, 2024, peer-reviewed May 06, 2024, accepted May 09, 2024

Abstract: This paper presents a study of the electrical properties of colloidal silver sulfide quantum dots thin films ($\text{Ag}_2\text{S/SiO}_2$ QDs) and silver sulfide quantum dots decorated with Au plasmon nanoparticles ($\text{Ag}_2\text{S/SiO}_2/\text{Au}$ QDs). A study of the conductivity temperature dependences was carried out in the temperature range from 300 to 360 K. The activation energy values were obtained from linear approximations of the current-voltage characteristics in Arrhenius coordinates. It has been shown that decorating $\text{Ag}_2\text{S/SiO}_2$ QDs with Au plasmon nanoparticles leads to an increase in the band gap from 0.29 to 0.89 eV. In this work, the ideality factor is calculated and the main conductivity mechanisms of the presented thin-film structures are determined. It has been shown that decorating $\text{Ag}_2\text{S/SiO}_2$ QDs with Au plasmon nanoparticles leads to a change in the conductivity type. According to the Mott-Gurney model, the charge carriers mobility is calculated.

Keywords: quantum dots, silver sulfide, activation energy, charge carrier mobility

UDC 537.312.6, 538.935, 53.096

Acknowledgments: This work has been supported by the grants the Russian Science Foundation, RSF 23-22-10007 and Crimea region.

For citation: Alim S. Mazinov, Andrey S. Tyutyunik, Vladimir S. Gurchenko. Electrophysical and temperature characteristics of Ag_2S quantum dots thin layers. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(3)387-394e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.387.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (388)
2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ (389)
3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ (389)
 - 3.1. РАСЧЁТ ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ (389)
 - 3.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОМИНИРУЮЩЕГО МЕХАНИЗМА ПРОВОДИМОСТИ (391)
4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (392)

ЛИТЕРАТУРА (393)

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы исследователи уделяют большое внимание свойствам наноструктур, реализованных на базе полупроводниковых коллоидных квантовых точек (КТ). Особый интерес вызывают новые структурные, электрические и оптические свойства, полученные посредством включения проводящих и полупроводниковых наноматериалов в структуру КТ [1-4]. Наряду с этим интерес к коллоидным КТ обусловлен квантово-размерным эффектом, который определяет уникальные свойства квантовых точек. В частности, изменение размера КТ позволяет управлять положением пиков фотолюминесценции [5,6]. Как следствие коллоидные квантовые точки выступают в качестве активных элементов нового поколения фотодетекторов [3], ИК сенсоров [7], солнечных элементов [8,9], фототранзисторов [4]. При этом использование коллоидных растворов КТ позволяет получить необходимые для приложений тонкие плёнки такими методами как спин-коатинг, дип-коатинг, технология Лэнгмюра-Блоджетт и т.п. [3,4,9].

Полупроводниковые коллоидные КТ сульфида серебра (Ag_2S) являются перспективными материалами с точки зрения их использования в качестве активных слоёв в современной электронике [9-11]. Преимуществом использования квантовых точек на основе

сульфида серебра является его малая токсичность и высокая эффективность. Квантовые точки Ag_2S характеризуются высоким коэффициентом поглощения и излучения электромагнитной энергии, высокой химической стабильностью и шириной запрещенной зоны порядка 0.9-1.1 эВ [12,13]. Исследователями было показано, что изменение размера частиц сульфида серебра позволяет варьировать ширину запрещенной зоны. Уменьшение среднего размера наночастиц Ag_2S с ~ 500 нм до ~ 60 нм приводит к увеличению ширины запрещенной зоны E_g с 0.88 до 1.21 эВ, что может быть использовано в устройствах фотовольтаики [14]. Также установлено существенное влияние размерного эффекта и химической структуры на транспорт носителей заряда. В частности, квантово-размерный эффект проявляется в виде закономерностей в процессах возбуждения и распада экситонов [8]. Достижение высоких значений подвижности носителей заряда также тесно связано с выбором поверхностного лиганда КТ, в том числе с использованием плазмонных наночастиц [6,9,12]. Однако исследования процессов переноса заряда коллоидных квантовых точек в литературе встречаются крайне редко. Отметим, что исследование КТ Ag_2S в основном посвящены люминесцентным, оптическим и фотокаталитическим свойствам, тогда как исследования механизмов образования и распада экситонов и механизмов проводимости в таких структурах являются актуальными и исследованы не в полной мере.

Данная работа направлена на исследование проявлений плазмон-экситонных взаимодействий при температурном воздействии для сэндвич структур и посвящена исследованию электрофизических свойств тонких плёнок КТ Ag_2S , покрытых молекулами (3-меркаптопропил)-триметоксисилана (МРТМС), а также

декорированных сферическими наночастицами Au (НЧ Au). Работа направлена на исследование механизмов проводимости коллоидных КТ Ag₂S. Представленные здесь материалы являются развитием исследований электрофизических параметров сэндвич структур на основе плёнок КТ Ag₂S/SiO₂ и КТ Ag₂S/SiO₂/Au, о которых нами сообщалось ранее [15].

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследований служили коллоидные квантовые точки Ag₂S, приготовленные методами водного синтеза [15,16]. Методика синтеза коллоидных квантовых точек Ag₂S/SiO₂ заключалась в смешивании водных растворов нитрата серебра (AgNO₃) и (3-меркаптопропил)-триметоксисилана (МРТМС) в молярном соотношении 1:2 при рН 10. Далее в реакционную смесь добавляли водный раствор сульфида натрия (Na₂S) в молярном соотношении к AgNO₃ – 0.6:1.

Методика синтеза коллоидных квантовых точек Ag₂S/SiO₂, декорированных на поверхности плазмонными НЧ Au заключалась в следующем. Отдельно были синтезированы плазмонные НЧ Au средним размером ~2-3 нм. Наночастицы золота были получены в ходе реакции восстановления золотохлорводородной кислоты (HAuCl₄ 1 мМ) водным раствором боргидрида натрия (NaBH₄ 0.2 мМ) в присутствии цетилтриметиламмония бромида (ЦТАБ 40 мМ) [17,18]. Декорирование поверхности КТ Ag₂S/SiO₂ плазмонными НЧ Au осуществляли путем дополнительной функционализации интерфейсов КТ аминоклассами. В частности,

производили внесение этанольного раствора (3-аминопропил)-триметоксисилана (АРТМС) в коллоидный раствор КТ Ag₂S/SiO₂. Далее осуществляли смешивание коллоидных растворов НЧ Au и КТ Ag₂S/SiO₂ в соотношении ~ 6:1 соответственно (далее КТ Ag₂S/SiO₂/Au) [17,18].

Формирование тонких плёнок КТ Ag₂S/SiO₂ и КТ Ag₂S/SiO₂/Au осуществляли методом полива на проводящие подложки [19]. Исследование электрических параметров тонких плёнок квантовых точек было реализовано путем формирования сэндвич-структур Al-Ag₂S/SiO₂-ITO и Al-Ag₂S/SiO₂/Au-ITO (рис. 1) [20]. Проводящие подложки алюминия и оксида индия-олова (ITO), были получены методом магнетронного напыления. Удельное сопротивление ITO составляло 16-18 Ом/кв, в свою очередь сопротивление алюминия - 20 Ом/кв. Исходный раствор исследуемых материалов в объёме 0.4 мл наносился на поверхность подложек, геометрические параметры которых составляли – 10×10 мм.

Проводящие свойства, в том числе температурные зависимости проводимости исследуемых структур измерялись при помощи анализатора полупроводников Keysight B1500A. Исследование проводящих свойств осуществлялось посредством анализа вольт-амперных характеристик (ВАХ). Измерения проводились в диапазоне напряжений от -1 до 1 В. Исследование температурных зависимостей реализовано при помощи экранированной камеры (клетка Фарадея), помещённой в муфельную печь. Температурный диапазон составлял от 300 до 360 К.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. РАСЧЁТ ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ

В ходе проведения температурных измерений, в условиях прикладываемого к исследуемому образцу электрического поля малой напряжённости ($E < 10^2$ В/см), было обнаружено, что температурная зависимость проводимости подчиняется известному экспоненциальному закону [21]:

$$\sigma = \sigma_0 e^{\frac{-E_a}{2kT}}, \tag{1}$$

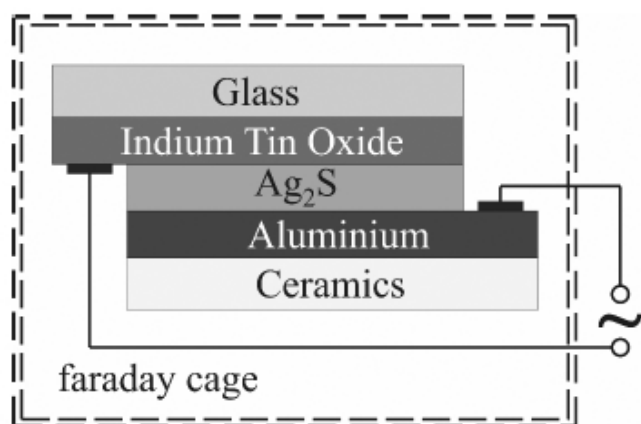


Рис. 1. Схема сэндвич-структуры в измерительной камере.

где E_a - энергия активации, σ - электропроводность исследуемого материала, k - постоянная Больцмана. Энергия активации в таком случае равна:

$$E_a = \frac{2kT_1T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{\sigma}{\sigma_0}, \quad (2)$$

где T_1, T_2 - начальная и конечная температуры соответственно; σ_0 и σ - электропроводности исследуемого материала при начальной и конечной температуре.

Таким образом, для тонкопленочных коллоидных квантовых точек значение энергии активации составило: КТ Ag_2S/SiO_2 - 0.3 эВ и КТ $Ag_2S/SiO_2/Au$ - 0.87 эВ. Отметим, что декорирование КТ Ag_2S/SiO_2 плазмонными наночастицами золота приводит к увеличению ширины запрещённой зоны.

Рассмотрим далее электрофизические свойства исследуемых тонкопленочных структур КТ Ag_2S/SiO_2 и КТ $Ag_2S/SiO_2/Au$ в области более высоких приложенных полей ($E > 10^2$ В/см). На **Рис. 2** представлены вольт-амперные характеристики в температурном диапазоне (ВАХТ) плёнок Ag_2S , сформированных в виде сэндвич структуры ИТО- Ag_2S/SiO_2 -Al и ИТО- $Ag_2S/SiO_2/Au$ -Al. Отметим, что для КТ Ag_2S/SiO_2 наблюдается уменьшение проводимости при увеличении температуры (Рис. 2a). В свою очередь при возрастании температуры проводимость КТ $Ag_2S/SiO_2/Au$ увеличивается, что может быть связано с тепловым возбуждением носителей заряда и обусловлено проявлением плазмон-экситонного взаимодействия в системе КТ $Ag_2S/SiO_2/Au$ (Рис. 2b).

Ранее нами было показано, что при температуре 300 К коллоидные КТ $Ag_2S/SiO_2/Au$ имеют ВАХ близкую к линейной, что определяется омической проводимостью этой

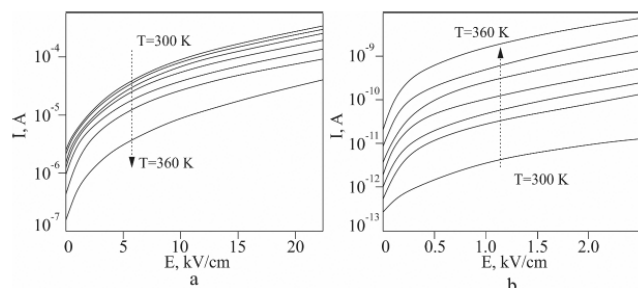


Рис. 2. ВАХТ тонкопленочных КТ Ag_2S/SiO_2 - (a) и КТ $Ag_2S/SiO_2/Au$ - (b).

структуры [15]. Воздействие электромагнитным излучением видимого диапазона приводит к нелинейности ВАХ и изменению типа проводимости сэндвич структуры с омического на барьерный [15].

В данной работе мы наблюдаем схожее проявление изменения типа проводимости сэндвич структуры ИТО- $Ag_2S/SiO_2/Au$ -Al. Аналогично предыдущим исследованиям, при температуре 300 К наблюдается идентичная, практически линейная ВАХ, однако при нагреве структуры прослеживается увеличение нелинейности характеристики. Нелинейная ВАХ указывает на формирование барьерной структуры, в которой протекающий ток определяется инжекцией носителей заряда через барьер. Поэтому можно заключить, что в сэндвич структуре ИТО- $Ag_2S/SiO_2/Au$ -Al также возникает барьер Шоттки на границе контакта Al- Ag_2S/SiO_2 , аналогично структуре ИТО- Ag_2S/SiO_2 -Al. Механизм проводимости по типу эмиссии Шоттки [22, 23] и описывается уравнением (3):

$$J = A^*T^2 \exp \left\{ \frac{-e \left[\varphi_b - \sqrt{eE / (4\pi\epsilon_r\epsilon_0)} \right]}{kT} \right\}, \quad (3)$$

где J - плотность тока; A^* - эффективная константа Ричардсона (m - эффективная масса носителей заряда; h - постоянная Планка); T - абсолютная температура; e - заряд электрона; φ_b - высота барьера Шоттки; E - напряжённость электрического поля; ϵ_r - динамическая диэлектрическая проницаемость; ϵ_0 - диэлектрическая постоянная; k - постоянная Больцмана.

$$A^* = 4\pi e m^* k^2 / h^3. \quad (4)$$

Для определения механизма проводимости, построим ВАХТ в координатах Шоттки $\ln J(\sqrt{E})$ (Рис. 3) [24,25]. Наклон линейных

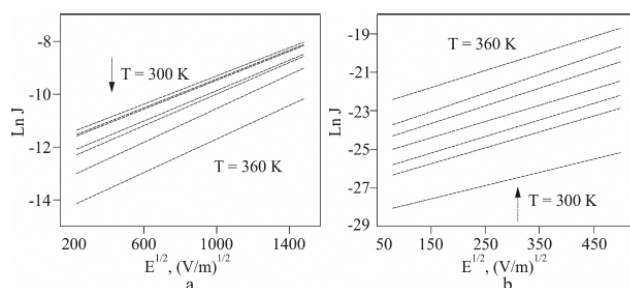


Рис. 3. ВАХТ в координатах Шоттки КТ Ag_2S/SiO_2 - (a) и КТ $Ag_2S/SiO_2/Au$ - (b).

аппроксимаций ВАХТ меняется в зависимости от температуры.

Исходя из значений угла наклона линейных аппроксимаций, в координатах Шоттки можно вычислить значение ϵ_r , воспользовавшись уравнением (3) [26]:

$$\epsilon_r = \frac{e^3}{4\pi\epsilon_0 b^2 k^2 T^2}, \quad (5)$$

где b – тангенс угла наклона линейных аппроксимаций ВАХТ в координатах Шоттки.

Для оценки влияния нагрева на величину тока в исследуемых плёночных структурах за счёт возбуждения носителей в зоне проводимости, ВАХТ могут быть рассмотрены в рамках теории термоэлектронной эмиссии [27,28]. В свою очередь ток, обусловленный тепловым возбуждением носителей заряда, будет описываться выражением (6):

$$J = A^* T^2 \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right), \quad (6)$$

где E_a – энергия активации носителей заряда. Прологарифмировав (6), получим (7):

$$\ln J = \ln(A^* T^2) - \frac{E_a}{kT}. \quad (7)$$

Представление ВАХТ в координатах Аррениуса ($\ln J$ и $(kT)^{-1}$), позволит найти значение энергии активации носителей заряда (Рис. 4) [24]. В частности, энергия активации соответствует наклону линейных аппроксимаций ВАХТ.

По своей сути, энергия активации является эффективной высотой барьера Шоттки и описывается уравнением (7) [29]:

$$E_a = e\phi_b - \sqrt{e^3 E / (4\pi\epsilon_r \epsilon_0)}. \quad (8)$$

Значения энергии активации носителей заряда тонкоплёночных коллоидных КТ,

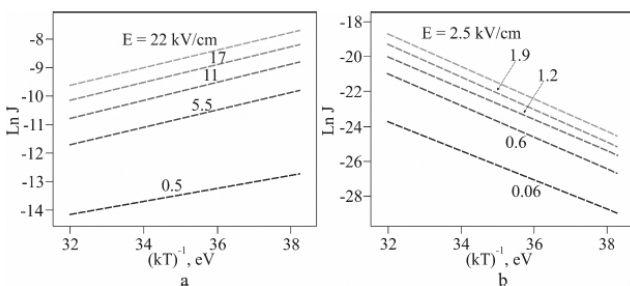


Рис. 4. ВАХТ в координатах Аррениуса КТ Ag₂S/SiO₂ – (а) и КТ Ag₂S/SiO₂/Au – (б).

вычисленные из линейных аппроксимаций ВАХТ в координатах Аррениуса, составило: КТ Ag₂S/SiO₂ – 0.29 эВ и КТ Ag₂S/SiO₂/Au – 0.89 эВ. Отметим, что значения энергии активации, полученные из линейных аппроксимаций ВАХТ в координатах Аррениуса, коррелируются с результатами, полученными при помощи экспоненциального закона (уравнение 1).

3.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОМИНИРУЮЩЕГО МЕХАНИЗМА ПРОВОДИМОСТИ

Для определения механизма проводимости и оценки использования исследуемых материалов в органической электронике был рассчитан фактор идеальности η , который определялся по наклону линейной части прямого смещения графика $\ln(I)$ - V и рассчитывался из соотношения [30]:

$$\eta = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)}. \quad (9)$$

Учитывая параметры η идеального диода, у которого доминирующим является термоэлектронный эмиссионный механизм, фактор идеальности равен единице.

Полученные значения η для исследуемых плёночных структур Ag₂S больше единицы (Таблица 2). Следовательно, механизм проводимости таких соединений сложнее [31].

Определим доминирующий механизм проводимости, представив вольт-амперные характеристики в логарифмической шкале (Рис. 5). В таком случае, зависимость тока от приложенного напряжения описывается типичным степенным законом $I \sim V^m$ [32], где m – значение наклона для каждой области приложенного напряжения характеризует кинетику носителей заряда.

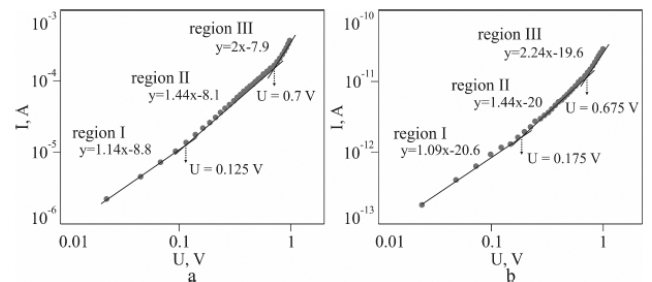


Рис. 5. Логарифм плотности тока как функция логарифма приложенного напряжения при отрицательном смещении, где: КТ Ag₂S/SiO₂ – (а) и КТ Ag₂S/SiO₂/Au – (б).

Таблица 1

Механизм проводимости КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2$ и КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$

Соединение	$m1$	$m2$	$m3$	$U(m1), \text{В}$	$U(m2), \text{В}$	$U(m3), \text{В}$
КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2$	1.14	1.45	2	0 – 0.125	0.125 – 0.7	> 0.7
КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$	1.09	1.44	2.24	0 – 0.175	0.175 – 0.675	> 0.675

Рассматривая сэндвич структуру ИТО- $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2$ -Al, при температуре $T = 300 \text{ К}$, мы можем выделить три региона характеризующие кинетику носителей заряда (Рис. 5а). Резистивный механизм проводимости, характеризующийся коэффициентом m , соответствует диапазону напряжений от 0 до 0.125 В (коэффициент $m1$, Таблица 1). Токковый режим с ограниченным пространственным зарядом (space charge limited conduction (SCLC))[30] работает в диапазоне напряжений от 0.125 до 0.7 В (коэффициент $m2$, Таблица 1). Третий диапазон, соответствующий переносу заряда за счет механизма trap charge limited conduction (TCLC) работает при напряжениях более 0.7 В (коэффициент $m3$, Таблица 1) [30].

Анализируя сэндвич структуру ИТО- $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$ -Al ранее было показано, что при температуре $T = 300 \text{ К}$, доминирующим механизмом проводимости является резистивный механизм. При построении в логарифмической шкале зависимости плотности тока от напряжения, мы также получаем линейную характеристику, что определяется омической проводимостью. В свою очередь нагрев КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$ сопровождается увеличением нелинейности ВАХ – формированием барьера. В связи с этим рассмотрим механизмы проводимости сэндвич структуры ИТО- $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$ -Al при температуре $T = 360 \text{ К}$ (Рис. 5б). Можно выделить три региона отличающиеся углом наклона. Резистивный механизм проводимости КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$ соответствует диапазону напряжений от 0 до 0.175 В (коэффициент $m1$, Таблица 1). Механизм SCLC преобладает в диапазоне напряжений от 0.175 до 0.675 В (коэффициент

$m2$, Таблица 1). Перенос заряда за счет механизма TCLC работает при напряжениях более 0.675 В (коэффициент $m3$, Таблица 1).

Параметр подвижности носителей заряда с ограниченным пространственным зарядом (SCLC) согласно модели Мотта-Герни [31], может быть описан следующим образом:

$$J_{SCLC} = \frac{9}{8} \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_{eff} \frac{V^2}{d^3}, \quad (10)$$

где ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость материала; d – толщина плёнки; V – приложенное напряжение, а μ_{eff} – эффективная подвижность заряда. Эффективная подвижность носителей заряда КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2$ и КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$ рассчитанная в соответствии с моделью Мотта-Герни представлена в Таблице 2.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования электрофизических свойств коллоидных КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2$ и $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$ подтверждены закономерности, указывающие на изменение типа проводимости с барьерной на омическую при декорировании $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2$ плазмонными наночастицами золота. Также установлено, что температурное воздействие на сэндвич-структуру ИТО- $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$ -Al приводит к нелинейности ВАХ и изменению типа проводимости сэндвич-структуры с омического на барьерный. Показано, что проводимость сэндвич-структур ИТО- $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2$ -Al и ИТО- $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$ -Al определяется барьером Шоттки на границе КТ Ag_2S пленка-Al. С использованием двух методов были рассчитаны значения энергии активации процесса теплового возбуждения носителей заряда.

Показано, что декорирование КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2$ плазмонными наночастицами золота приводит к увеличению ширины запрещенной зоны с 0.29 до 0.89 эВ. Данный факт может быть обусловлен проявлением мелких ловушек плазмон-экситонного взаимодействия в системе КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$, что косвенно

Таблица 2

Энергия активации, фактор идеальности и кинетика носителей заряда КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2$ и КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$

Соединение	$E_a, \text{эВ}$	Фактор идеальности η	$\mu_{eff}, \text{м}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$
КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2$	0.29	3.39	3.81×10^{-7}
КТ $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2/\text{Au}$	0.89	1.37	1.25×10^{-10}

подтверждается уменьшением подвижности носителей заряда с 3.81×10^{-7} до 1.25×10^{-10} м²В⁻¹с⁻¹. Полученные результаты указывают на возможность разработки модельных диодных структур на основе коллоидных КТ Ag₂S/SiO₂ и Ag₂S/SiO₂/Au.

ЛИТЕРАТУРА

1. Alharthi SS, Alzahrani A, Razvi MAN, Badawi A, Althobaiti MG. Spectroscopic and Electrical Properties of Ag₂S/PVA Nanocomposite Films for Visible-Light Optoelectronic Devices. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 2020, 30(1):3878-3885.
2. Cotta MA. Quantum Dots and Their Applications: What Lies Ahead? *ACS Applied Nano Materials*, 2020, 3(6):4920-4924.
3. Lei Y, Xu S, Ding M, Li L, Sun Q, Wang ZL. Enhanced Photocatalysis by Synergistic Piezotronic Effect and Exciton-Plasmon Interaction Based on (Ag-Ag₂S)/BaTiO₃ Heterostructures. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(51):2005716.
4. Gao H, Wang F, Wang S, Wang X, Yi Z, Yang H. Photocatalytic activity tuning in a novel Ag₂S/CQDs/CuBi₂O₄ composite: Synthesis and photocatalytic mechanism. *Materials Research Bulletin*, 2019, 115:140-149.
5. Kubendhiran S, Bao Z, Dave K, Liu R-S. Microfluidic Synthesis of Semiconducting Colloidal Quantum Dots and Their Applications. *ACS Applied Nano Materials*, 2019, 2(4):1773-1790.
6. Chand S, Sharma E, Sharma P. Phase change induced quantization in NIR emitting Ag₂S nanocrystals: structural and optical response for solar energy applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 770:1173-1180.
7. Smirnov MS, Ovchinnikov OV. IR luminescence mechanism in colloidal Ag₂S quantum dots. *Journal of Luminescence*, 2020, 227:117526.
8. Mir WJ, Swarnkar A, Sharma R, Katti A, Adarsh KV, Nag A. Origin of Unusual Excitonic Absorption and Emission from Colloidal Ag₂S Nanocrystals: Ultrafast Photophysics and Solar Cell. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 2015, 6(19):3915-3922.
9. Tretyakov I, Svyatodukh S, Perepelitsa A, Ryabchun S, Kaurova N, Shurakov A, Smirnov M, Ovchinnikov O, Goltsman G. Ag₂S QDs/Si Heterostructure-Based Ultrasensitive SWIR Range Detector. *Nanomaterials*, 2020, 10(5):861.
10. Geiregat P, Thourhout DV, Hens Z. A bright future for colloidal quantum dot lasers. *NPG Asia Materials*, 2019, 11(1).
11. Ruiz D, del Rosal B, Acebron M, Palencia C, Sun C, Cabanillas-Gonzalez J, Lopez-Haro M, Hungria AB, Jaque D, Juarez BH. Ag/Ag₂S nanocrystals for high sensitivity near-infrared luminescence nanothermometry. *Advanced Functional Materials*, 2016, 27(6):1604629.
12. Zamiri R, Abbastabar Ahangar H, Zakaria A, Zamiri G, Shabani M, Singh B, Ferreira JMF. The structural and optical constants of Ag₂S semiconductor nanostructure in the Far-Infrared. *Chemistry Central Journal*, 2015, 9(1).
13. Banerjee S, Bhattacharya S, Chakravorty D. Resistivity Hysteresis of Ag₂S Nanocomposites. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2007, 111(36):13410-13413.
14. Sadovnikov SI, Kuznetsova YV, Rempel AA. Ag₂S silver sulfide nanoparticles and colloidal solutions: Synthesis and properties. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 2016, 7:81-91.
15. Gurchenko VS, Mazinov AS, Tyutyunik AS, Grevtseva IG, Smirnov MS, Chevychelova TA, Ovchinnikov OV. The voltage-current and spectral characteristics of thin layers of Ag₂S quantum dots and their mixtures with plasmon nanoparticles. *Journal of the Korean Physical Society*, 2023, 83:471-476.
16. Perepelitsa AS, Ovchinnikov OV, Smirnov MS, Kondratenko TS, Grevtseva IG, Aslanov SV, Khokhlov VY. Structural and optical properties of Ag₂S/SiO₂ core/shell quantum dots. *Journal of Luminescence*, 2021, 231:117805.
17. Grevtseva IG, Ovchinnikov OV, Smirnov MS, Kondratenko TS, Perepelitsa AS, Hussein AMH. Luminescence of Ag₂S/SiO₂ Colloidal Quantum Dots Decorated with Small Au Nanoparticles. *Optics and Spectroscopy*, 2022, 130(11):567-572.
18. Grevtseva IG, Ovchinnikov OV, Smirnov MS, Tikhomirov SA, Ponyavina AN, Binh NTh, Minh PhH, Turishchev SU, Chuvenkova OA. Formation of plasmon-exciton nanostructures upon decorating Ag₂A/SiO₂ quantum dots with Au nanoparticles. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2022, 86(6):692-695.

19. Gusev AN, Mazinov AS, Tyutyunik AS, Fitaev IS, Gurchenko VS, Braga EV. Effect of Doping with N, Br, and F Atoms on Electrodynamic Characteristics and Physical Properties of Isatin- β -anil. *Technical Physics*, 2021, 66(1):84-92.
20. Gusev AN, Mazinov AS, Shevchenko AI, Tyutyunik AS, Gurchenko VS, Braga EV. Research of heterojunctions based on the system of fullerene and hydrazine. *Applied Physics*, 2019, (6):48-53.
21. Laidler KJ. The development of the Arrhenius equation. *Journal of Chemical Education*, 1984, 61(6):494.
22. Lengyel G. Schottky Emission and Conduction in Some Organic Insulating Materials. *Journal of Applied Physics*, 1966, 37(2):807-810.
23. Matsumura M, Jinde Y, Akai T, Kimura T. Analysis of Current-Voltage Characteristics of Organic Electroluminescent Devices on the Basis of Schottky Emission Mechanism. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1996, 35(11):5735-5739.
24. Tyutyunik AS, Gurchenko VS, Mazinov AS. Investigation of temperature dependences of current-voltage characteristics of hybrid organic materials based on zinc complexes. *Applied Physics*, 2021, (5):81-87.
25. Rusu M, Rusu GI. High-field electrical conduction in thin-film sandwich structures of the metal/organic semiconductor/metal type. *Applied Surface Science*, 1998, 126(3-4):246-254.
26. Белявский ПЮ, Плотников ВВ. Исследование температурных зависимостей вольт-амперных характеристик тонкопленочных конденсаторов на основе твердых растворов титаната бария стронция. *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*, 2016, 1:38-43.
27. Badali Y, Azizian-Kalandaragh Y, Akhlaghi EA, Altindal S. Ultrasound-Assisted Method for Preparation of Ag₂S Nanostructures: Fabrication of Au/Ag₂S-PVA/n-Si Schottky Barrier Diode and Exploring Their Electrical Properties. *Journal of Electronic Materials*, 2020, 49(1).
28. De Leeuw DM, Lous EJ. Metal-insulator-semiconductor Schottky-type diodes of doped thiophene oligomers. *Synthetic Metals*, 1994, 65(1):45-53.
29. Chang S-T, Lee JY. Electrical conduction mechanism in high-dielectric-constant (Ba_{0.5},Sr_{0.5})TiO₃ thin films. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(4):655-657.
30. Gusev A, Braga E, Tyutyunik A, Gurchenko V, Berezovskaya M, Kryukova M, Kiskin M, Linert W. Synthesis, Photoluminescence and Electrical Study of Pyrazolone-Based Azomethine Ligand Zn(II) Complexes. *Materials*, 2020, 13(24):5698.
31. Dhifaoui H, Aloui W, Bouazizi A. Optical, electrochemical and electrical properties of p-N,N-dimethyl-amino-benzylidene-malononitrile thin films. *Materials Research Express*, 2020, 7(4):045101.
32. Gupta RK, Ghosh K, Kahol PK. Fabrication and electrical characterization of Au/p-Si/STO/Au contact. *Current Applied Physics*, 2009, 9(5):933-936.

Мазинов Алим Сеит-Аметович

д.ф.-м.н., доцент

Крымский фед. ун-т им. В.И. Вернадского

Симферополь 295007, Россия

E-mail: mazinovas@cfuv.ru

Тютюник Андрей Сергеевич

к.ф.-м.н.

Крымский фед. ун-т им. В.И. Вернадского

Симферополь 295007, Россия

E-mail: tyutyunikas@mail.ru

Гурченко Владимир Сергеевич

м.н.с.

Крымский фед. ун-т им. В.И. Вернадского

Симферополь 295007, Россия

E-mail: gurchenko_v@mail.ru.