

Прикладные особенности фоточувствительных сенсоров на основе контакта полупроводник–электролит

И. В. Демиденко

Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко,
г. Тирасполь, MD-3300, Молдова
e-mail: demidenko.vanya@list.ru

Поступила в редакцию 01.11.2021

После доработки 18.03.2022

Принята к публикации 23.03.2022

Рассмотрены особенности отклонения потенциала обесточенной цепи на контакте полупроводник–электролит, где в качестве полупроводникового материала применяются сульфиды кадмия и цинка. Предложены модели эквивалентных электрических цепей, объясняющие наблюдаемые явления. Приведены примеры устройств, реализованных на базе результатов проведенных исследований.

Ключевые слова: фоточувствительный сенсор, потенциал обесточенной цепи, контакт полупроводник–электролит, CdS, ZnS, Cd_{0,95}Zn_{0,05}S

УДК 681.586.72

<https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.3.78>

ВВЕДЕНИЕ

Применение полупроводниковых материалов в качестве электродов в электрохимических системах предоставляет исследователю возможность влиять на потенциал электрода посредством облучения его поверхности светом. Основной интерес к данной области обусловлен исследованиями в области энергетики [1, 2]. Однако в последние годы помимо разработок, направленных на преобразование солнечной энергии, исследователи стали уделять внимание структурам на контакте полупроводник–электролит, призванным исполнять роль сенсоров [3]. Данное направление перспективно как с точки зрения расширения функционала полностью твердотельных сенсоров, так и с точки зрения упрощения процесса их изготовления.

В настоящей работе рассмотрены особенности изменения потенциала разомкнутой цепи – ф структуры полупроводник (CdS, ZnS)–электролит (водный раствор Na₂SO₄) при воздействии импульса лазерного излучения на пленки CdS, ZnS, а также их твердого раствора Cd_{0,95}Zn_{0,05}S. Описан ряд экспериментальных, фоточувствительных устройств, структура которых построена на контакте полупроводник–электролит.

Цель данной работы – определение оптимальных условий регистрации видимого и ближнего ультрафиолетового излучения на структуре полупроводник–электролит для дальнейшего применения полученных результатов в области приборостроения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В ходе исследований свойств структуры полупроводник–электролит применялись полупроводниковые пленки сульфидов кадмия, цинка, а также их твердых растворов, синтезированные путем электрохимического осаждения на поверхность SnO₂ катодов по технологии, описанной в работах [4–6]. Толщина пленок составляла 100–500 нм. Отклонение ф при облучении пленок светом регистрировали с помощью прибора с входным сопротивлением 100 Мом. Толщину пленок измеряли на интерференционном металлографическом микроскопе МИИ-4.

Для проведения исследований поверхность полупроводника либо смачивалась каплей свежеприготовленного электролита, в который вводился электрод сравнения, либо строилась сэндвич-структура из двух стеклянных пластин. Одна из пластин служила подложкой для исследуемой полупроводниковой пленки, а на второй методами фотолитографии формировались измерительные электроды. Полость между пластинами заполнялась электролитом, после чего структуру герметизировали силиконовым герметиком.

МЕХАНИЗМ ОТКЛОНЕНИЯ ф ОТ ТЕМНОВОГО ЗНАЧЕНИЯ

Согласно описанной в [1] модели, при использовании полупроводниковых электродов потенциал разомкнутой цепи ф под действием излучения на полупроводник отклоняется от

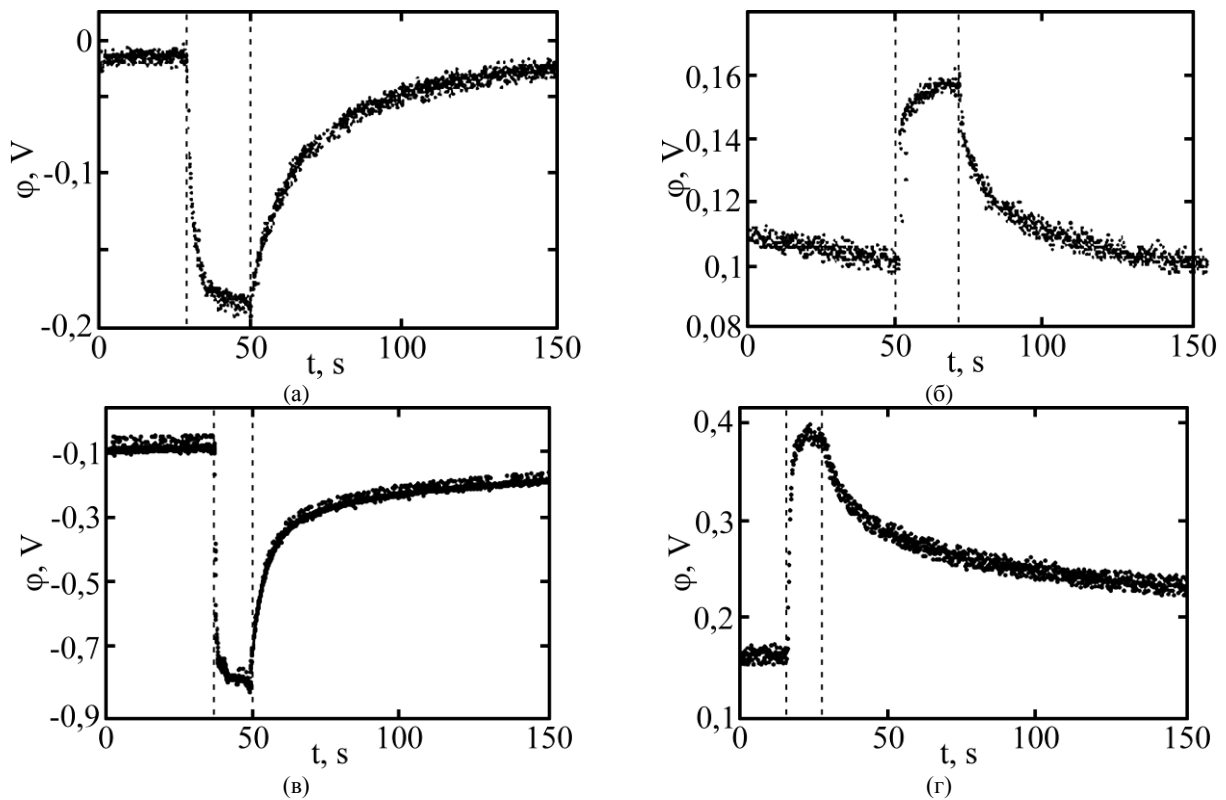


Рис. 1. Реакция потенциала обесточенной цепи на импульс лазерного излучения: (а) – $h\nu = 1,9$ эВ, CdS, легированный донорной примесью (In); (б) – $h\nu = 1,9$ эВ, CdS, легированный акцепторной примесью (Cu); (в) – $h\nu = 3$ эВ, нелегированный CdS; (г) – $h\nu = 3$ эВ ZnS, легированный серой. Измерения проводились в 0,25 М растворе Na_2SO_4 относительно хлорсеребряного электрода сравнения. Пунктиром отмечен промежуток времени, в течение которого проводилась засветка. Положение кривой до момента засветки соответствует ϕ_{dark} – темновому значению потенциала электрода.

темнового значения ϕ_{dark} на величину $\Delta\phi = \phi_{\text{light}} - \phi_{\text{dark}}$, где ϕ_{light} – величина потенциала, измеряемая относительно электрода сравнения при воздействии света на полупроводник, ϕ_{dark} – величина потенциала, измеряемая относительно электрода сравнения при отсутствии освещения. При этом модуль $\Delta\phi$ будет увеличиваться с ростом интенсивности излучения.

Для полупроводника *n*-типа отклонение происходит в отрицательную сторону, для полупроводника *p*-типа – в положительную. Данный процесс объясняется разгибанием энергетических зон на поверхности полупроводника вследствие изменения концентрации носителей заряда под действием излучения.

Измерения, проведенные на образцах CdS и ZnS, легированные различными донорными и акцепторными примесями, демонстрируют соответствие экспериментальных и модельных результатов (соответствие направления отклонения ϕ от темнового значения при воздействии излучения на полупроводник).

На рис. 1 приведены графики изменения ϕ во времени при облучении поверхности образцов CdS и ZnS светом. Образцы на рис. 1а,б легированы индием и медью соответственно. Примеси индия и меди подходят для данного эксперимента, так как, во-первых, они создают в сульфиде кадмия уровни противоположного типа

проводимости [2, 7, 8], во-вторых – не ионизированы при комнатных температурах (о чем свидетельствуют данные об их энергии ионизации [2, 7] и тот факт, что при комнатной температуре образцы, легированные упомянутой примесью, приобретают чувствительность к лазерному излучению $\lambda = 650$ нм). Таким образом, используя лазерное излучение с длиной волны $\lambda = 650$ нм, можно возбуждать только атомы примеси, исключая межзонные переходы.

Облучение пленки, легированной индием, сопровождается ионизацией донорной примеси, что повышает концентрацию электронов в зоне проводимости. Вследствие чего уровень Ферми смещается в сторону С-зоны, а потенциал электрода отклоняется в отрицательную сторону относительно темнового значения (рис. 1а). При воздействии света на полупроводник, легированный медью, происходит ионизация акцепторной примеси и частичная компенсация полупроводника, уровень Ферми смещается в сторону V-зоны, а потенциал электрода отклоняется в положительную сторону относительно темнового значения (рис. 1б).

Облучение пленки излучением с длиной волны $\lambda > E_g$ (например, лазерным излучением с энергией $h\nu = 3,06$ эВ) позволяет активировать межзонные переходы, что сопровождается

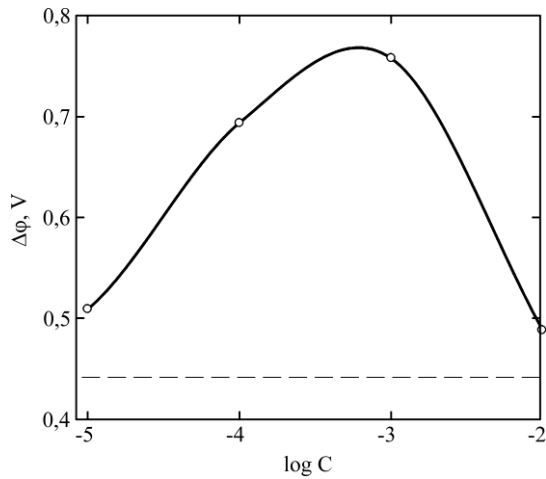


Рис. 2. Зависимость амплитуды $\Delta\phi$ при засветке CdS-электрода импульсом лазерного излучения от концентрации $-(C)$ $K_3[Fe(CN)_6]$ в растворе $0,0075$ М Na_2SO_4 . Пунктиром указан уровень, отвечающий чистому раствору $0,0075$ М Na_2SO_4 .

существенно большей амплитудой $\Delta\phi$ в сравнении со случаем, когда происходит ионизация только примесных уровней (рис. 1в,г). Это, очевидно, обусловлено более высоким квантовым выходом процесса межзонной генерации по сравнению с генерацией, обусловленной переходами с примесных уровней.

ЗАВИСИМОСТЬ АМПЛИТУДЫ $\Delta\phi$ ОТ СОСТАВА ПРИМЕНЯЕМОГО ЭЛЕКТРОЛИТА

Эксплуатация структур на контакте полупроводник-электролит неизбежно сталкивается с рядом ограничений, обусловленных разрушением полупроводникового электрода под действием различных фотокоррозионных процессов, химической или электрохимической природы, некоторые из них могут протекать даже при отсутствии электрического тока [1, 9]. Для преодоления данных ограничений либо ведут поиск стабильного в условиях эксплуатации полупроводникового материала, либо подбирают благоприятный электролит для конкретного полупроводникового электрода.

В работе [10] приведены результаты исследования защитного, антикоррозионного действия добавок различных ионов восстановителей (SO_3^{2-} , S^{2-} , $S_2O_3^{2-}$, Cl^- , J^- , $Fe(CN)_6^{4-}$) в электролит на базе водного раствора Na_2SO_4 . Сопоставление приведенных в указанной работе результатов с проведенными нами измерениями фоточувствительности систем на контакте CdS-водный раствор Na_2SO_4 , содержащий различные антикоррозионные добавки из указанного списка, позволили остановиться на применении электролита следующего состава $7,5$ мМ Na_2SO_4 ; $0,00075$ мМ $K_3[Fe(CN)_6]$. Данный состав позволяет получить наибольшую величину $\Delta\phi$ при прочих равных условиях. Введение небольшой

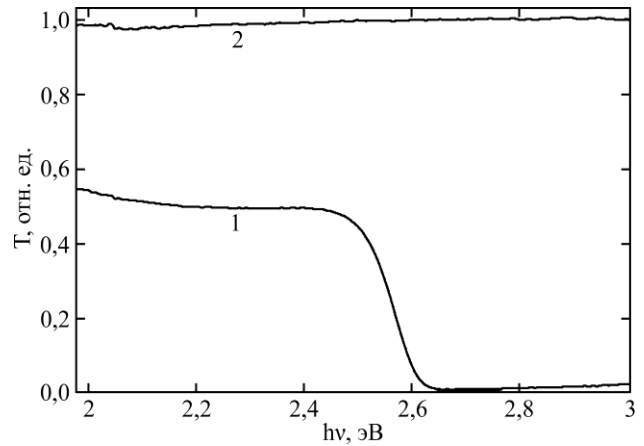


Рис. 3. Спектры пропускания $0,25$ М водного раствора: 1 – $K_3[Fe(CN)_6]$; 2 – Na_2SO_4 .

добавки $K_3[Fe(CN)_6]$ в раствор Na_2SO_4 не только защищает полупроводниковый электрод от коррозии, но и увеличивает фоточувствительность системы (см. рис. 2). Напротив, концентрация чистого раствора Na_2SO_4 не оказывает существенного влияния на фоточувствительность системы.

Рост фоточувствительности с ростом концентрации $K_3[Fe(CN)_6]$ в растворе, очевидно, обусловлен сдвигом потенциала образующейся редокс-системы в положительную сторону относительно потенциала плоских зон применяемого полупроводникового материала [1, 11].

Однако следует принять во внимание, что применение электролита с высоким содержанием гексацианоферрата калия сопряжено с падением фоточувствительности системы при облучении ее через слой электролита в связи с высоким коэффициентом поглощения данного раствора в видимой и коротковолновой области спектра 1 (см. рис. 3), чем объясняется наличие максимума на рис. 2.

Растворы Na_2SO_4 и $K_3[Fe(CN)_6]$ часто рассматриваются в качестве электролита для систем на контакте CdS-электролит [1, 2, 11], поскольку не претерпевают необратимых изменений в широком интервале потенциалов [12] и не взаимодействуют с сульфидами кадмия и цинка химическим путем.

В сравнении с $K_3[Fe(CN)_6]$ растворы Na_2SO_4 обладают высокой прозрачностью 2 (рис. 3). На практике это отражается в конструкции прибора, изготовленного с применением растворов данных солей. На рис. 4а продемонстрирована конструкция фотосенсора, чувствительного к коротковолновому излучению, исполненного в

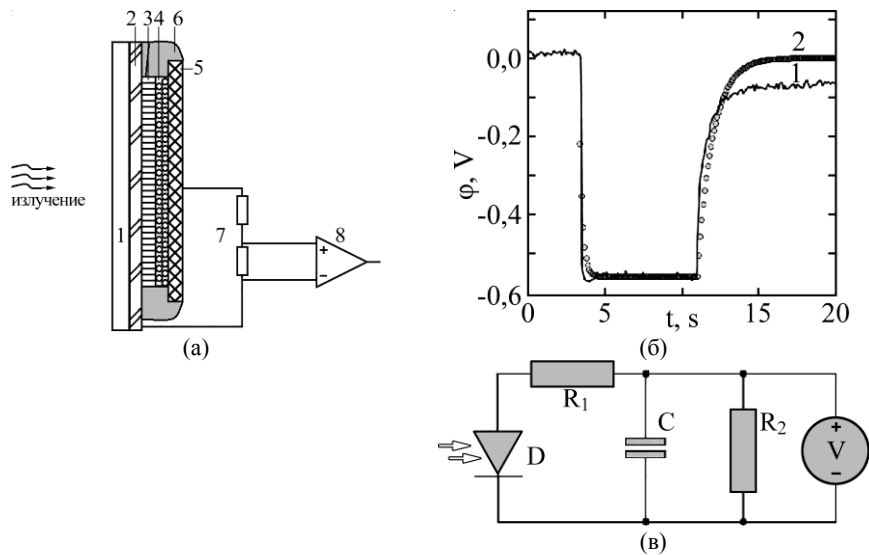


Рис. 4. Структура фотосенсора на контакте CdS–электролит (а): 1 – стеклянная подложка; 2 – слой SnO₂; 3 – слой CdS; 4 – электролит; 5 – измерительный электрод; 6 – силиконовый герметик; 7 – делитель напряжения; 8 – операционный усилитель. Динамика потенциала обесточенной цепи при воздействии на структуру импульсом света (б, кривая 1), модельные результаты при воздействии на эквивалентную электрическую цепь прямоугольным импульсом напряжения (б, кривая 2). Эквивалентная электрическая цепь (в).

виде сэндвич-структуры [13]. Применение раствора Na₂SO₄ в качестве электролита позволяет проводить засветку с обеих сторон прибора, поскольку прослойка раствора не оказывает существенного влияния на интенсивность проходящего через нее излучения. Замена раствора Na₂SO₄ на раствор K₃[Fe(CN)₆] ограничивает конструктивное разнообразие только вариантом, при котором излучение проходит сквозь прозрачную подложку, попадая непосредственно в слой полупроводника. В противном случае выигрыш в фоточувствительности от применения данного раствора сводится к минимуму вследствие поглощения излучения в слое электролита. Это может быть проблемой, если полупроводниковый слой выращивался на непрозрачной подложке или прибор должен реагировать на излучение, для которого подложка обладает существенным коэффициентом поглощения.

Одним из недостатков структур на контакте полупроводник–электролит является необходимость работать с веществом в жидкой фазе, что накладывает ряд ограничений на конструкцию прибора. В первую очередь нужны герметичность и механическая устойчивость. Для устранения данной проблемы в предложенных структурах применялся гелеобразный электролит, полученный путем коагуляции раствора выбранной соли с помощью 30% желатина с добавлением 10% глицерина в качестве пластификатора. При таком исполнении устраняется риск утечки электролита, существенно снижается скорость его высыхания, минимизируется влияние механических воздействий на прибор. Приведенные пропорции приблизи-

тельны и могут существенно варьировать в зависимости от состава применяемого электролита и условий эксплуатации прибора [14].

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ

Существенным недостатком сэндвич-структур на контакте полупроводник–электролит при эксплуатации их в качестве фотосенсоров является долгое время восстановления исходного, темнового значения выходного сигнала, что негативно сказывается на их быстродействии.

Принимая во внимание соответствие закона нарастания и спада кривых ϕ при облучении структуры светом с теоретическими кривыми, построенными для интегрирующей цепи 2 (рис. 4б) [15], а также учитывая емкостные свойства перехода полупроводник–электролит [1, 16], была построена модель (эквивалентная электрическая цепь), объясняющая природу инерционности фотопотенциала на данных структурах (рис. 4в). Согласно данной модели, облучение полупроводниковой пленки приводит к генерации носителей заряда и возникновению разности потенциалов между слоем SnO₂ 2 (рис. 4а), служащим подложкой, и измерительным электродом 5 (рис. 4а), который отделен от полупроводника слоем электролита 4 (рис. 4а). Вследствие чего барьерная емкость данной структуры накапливает заряд. Несмотря на относительно высокую емкость подобных структур, они обладают существенными токами утечки, чем определяется скорость спада ϕ до

темнового значения. Саморазряд, очевидно, имеет место в связи с несовершенством структуры применяемой поликристаллической пленки, наличием межзерновых пор и трещин, сквозь которые электролит контактирует с поверхностью SnO_2 , образуя субмикронные проводящие каналы, пронизывающие высокоомный слой полупроводника, что подтверждается микрофотографиями поверхности полупроводника.

Данная гипотеза подтверждается экспериментами, в ходе которых параллельно измерительным электродам фотосенсора подключали шунтирующий резистор, имитирующий сопротивление R_2 (рис. 4в). Измерения времени релаксации φ после засветки структуры при различном значении шунтирующего сопротивления демонстрирует (см. рис. 5) хорошее соответствие с модельными результатами, полученными при проведении симуляций с применением предложенной эквивалентной электрической цепи.

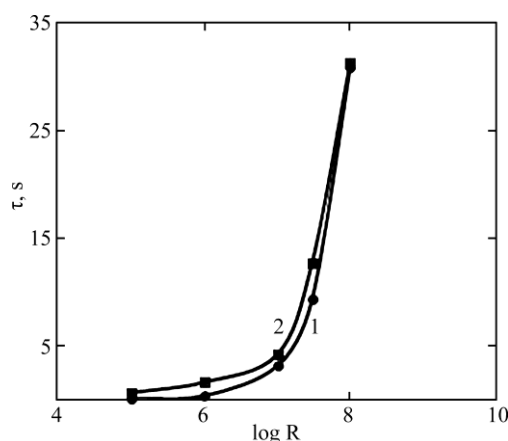


Рис. 5. Зависимость постоянной разряда барьерной емкости от величины шунтирующего сопротивления: 1 – модельные результаты; 2 – экспериментальные результаты.

Если бы природа нарастания и спада φ вследствие облучения полупроводника была обусловлена только процессами генерации и рекомбинации носителей заряда, изменение величины шунтирующего сопротивления не оказало бы воздействия на скорость релаксации фотопотенциала.

Сопоставление результатов измерений скорости нарастания φ на исследуемых образцах при их облучении источником с длиной волны $\lambda = 650, 552, 405$ нм позволяет предположить, что скорость нарастания потенциала определяется, в первую очередь, квантовым выходом процесса фотогенерации носителей заряда.

Принимая во внимание результаты моделирования, была разработана альтернативная конструкция фотоэлемента на контакте полупроводник–электролит. В данном случае регистрация потенциала производится относительно пары измерительных электродов, компланарно расположенных напротив полупро-

водникового слоя (рис. 6) [17]. В данной конструкции измеряется разность потенциалов, возникающая между электродом, находящимся напротив освещенного участка полупроводниковой пленки (рис. 6а), и электродом, расположенным напротив нечувствительного к свету участка SnO_2 5 (рис. 6а). Применение подобной конфигурации электрической цепи позволяет снизить инерционность фотоэлемента по сравнению с предыдущей моделью (см. рис. 6б) вследствие перехода от интегрирующей к дифференцирующей цепи.

Рассмотренную конструкцию можно усовершенствовать, если пространство под нефоточувствительным измерительным электродом 5 (рис. 6а) тоже покрыть фоточувствительным слоем, в качестве которого применить полупроводник с потенциалом обесточенной цепи, отклоненным при освещении в противоположную область (например, ZnS легированный медью) [18]. В этом случае засветка обоих секторов ячейки приведет к отклонению потенциала, регистрируемого каждым измерительным электродом от темнового значения, однако направление этого сдвига будет противоположно для каждого электрода. Разность потенциалов между измерительными электродами будет представлять собой модульную сумму значения потенциала обоих измерительных электродов. В результате амплитуда выходного сигнала увеличивается.

Точечное освещение поверхности полупроводникового электрода сопровождается локальным изменением потенциала, амплитуда которого убывает по мере отдаления от освещенного участка поверхности. Данный градиент потенциала по поверхности может быть измерен при использовании пары измерительных электродов в виде параллельных полос, расположенных компланарно напротив полупроводникового слоя (рис. 7) [19]. Контакт с поверхностью осуществляется посредством сплошного слоя электролита.

Если освещенное пятно приближается к одному из измерительных электродов, потенциал электрода возрастает обратно пропорционально расстоянию до освещенного пятна. При этом разность потенциалов между освещенным и неосвещенным измерительными электродами меняется соответственно. Перемещение освещенного пятна к противоположному измерительному электроду сопровождается инверсией знаков измеряемой разности потенциалов.

Применение конфигурации ячейки с четырьмя измерительными электродами, расположенными по периметру фоточувствительной

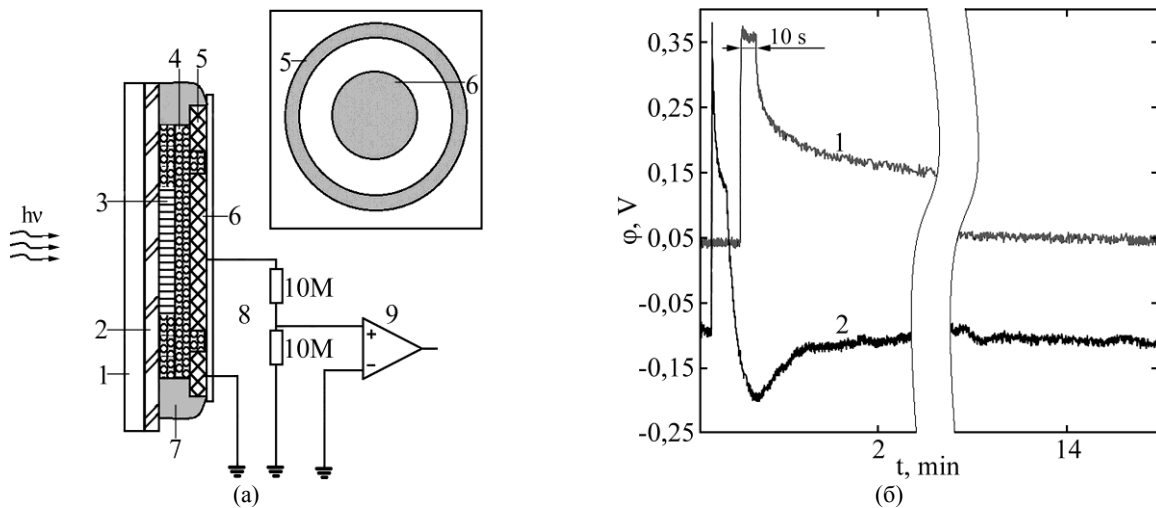


Рис. 6. Конструкция фотосенсора (а): 1 – стеклянная подложка; 2 – слой SnO_2 ; 3 – слой CdS ; 4 – электролит; 5, 6 – измерительные электроды; 7 – герметик; 8 – делитель напряжения; 9 – операционный усилитель. Динамика потенциала обесточенной цепи после облучения сенсора импульсом света (б): 1 – при измерении относительно слоя SnO_2 и центрального электрода; 2 – при измерении относительно измерительных электродов.

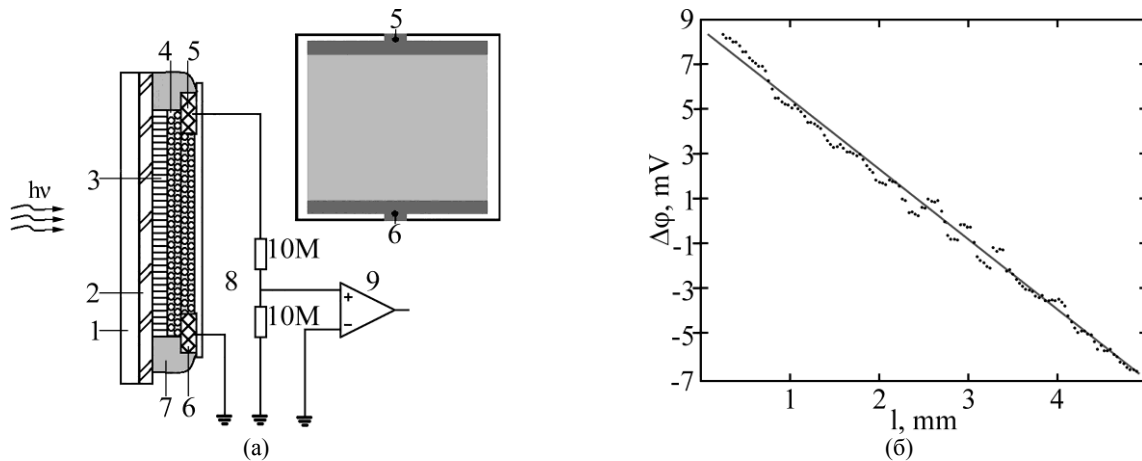


Рис. 7. Схема сенсора (а): 1 – стеклянная подложка; 2 – слой SnO_2 ; 3 – слой CdS ; 4 – электролит; 5, 6 – измерительные электроды; 7 – герметик; 8 – делитель напряжения; 9 – операционный усилитель. График зависимости $\Delta\phi$ от положения светового пятна, измеренной между электродами детектора при освещении поверхности импульсом лазерного излучения (б).

пленки, позволяет детектировать перемещение светового пятна по двум осям [20]. Перемещение луча вдоль оси X практически не сопровождается изменениями разности потенциалов между электродами, расположенными параллельно данной оси, так как в этом случае они эквипотенциальны относительно направления движения светового пятна. Напротив, изменение вектора движения светового пятна вдоль оси Y напрямую отражается на разности потенциалов рассматриваемой пары измерительных электродов. В этом случае в эквипотенциальном состоянии находятся измерительные электроды, расположенные параллельно оси Y .

УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОТИВОЭЛЕКТРОДОВ

В ходе проводимых исследований помимо конструктивного поиска параллельно проводился подбор материалов, подходящих для

формирования устойчивой структуры полупроводник–электролит–металл, не изменяющей своих характеристик во времени. В качестве материала для изготовления измерительных электродов одним из первых рассматривалась медь, применение которой удобно в связи с обилием фольгированных стеклотекстолитов различной толщины, позволяющих изготавливать электроды произвольной формы, пользуясь технологиями производства печатных плат.

Однако первые опыты показали, что, несмотря на то что в рассматриваемой электрохимической ячейке электрический ток практически отсутствует, спустя некоторое время медь диффундирует сквозь слой электролита и вступает в реакцию с полупроводниковой пленкой. Вследствие чего протекают реакции замещения кадмия двумя атомами меди [2].

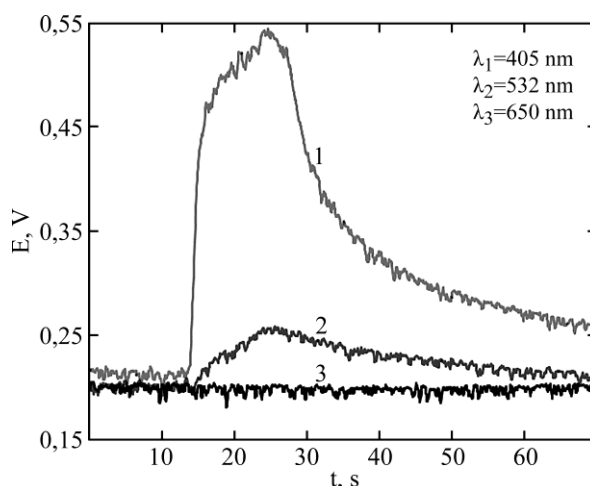


Рис. 8. Реакция потенциала обесточенной цепи на импульс лазерного излучения различной длины волны, зарегистрированная на контакте пленки $\text{Cd}_{0,95}\text{Zn}_{0,05}\text{S}$ с водным раствором $0,0075 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$.

Данный процесс сопровождается снижением фоточувствительности структуры и постепенным разрушением фоточувствительного слоя.

Лужение поверхности медных электродов оловом позволяет свести на нет процесс диффузии меди к поверхности полупроводника. Фотоэлектрохимические ячейки, построенные с применением подобных измерительных электродов, работали стабильно в течение всего времени наблюдений. Отрицательных воздействий на свойства ячейки вследствие диффузии олова к поверхности полупроводника не наблюдалось.

В качестве альтернативы были рассмотрены измерительные электроды из алюминия. С точки зрения электроотрицательности данный металл не способен замещать атомы кадмия или цинка в кристалле полупроводника [14], а применяемый электролит не является агрессивным и допускает применение алюминия. Однако работа с данным металлом сопряжена с неудобствами при пайке выводов к устройству.

Еще одним материалом в качестве измерительного электрода может служить электрод из SnO_2 , аналогичный тому, на котором осажден фоточувствительный слой. Учитывая пассивность применяемого электролита и практически отсутствие электрического тока в ячейке, измерительные электроды из оксида олова могут работать продолжительное время, не оказывая разрушительного воздействия на полупроводниковый слой и не разрушаясь сами. Однако формирование электродов произвольной формы в данном случае сопряжено с более сложным технологическим циклом, кроме того, к поверхности такого слоя проблематично припаять внешний вывод, а стеклянная подложка требует более бережного обращения.

Потенциально в список материалов, которые могли бы быть применены при изготовлении измерительных электродов можно добавить

золото, платину, нержавеющую сталь, графит. Однако их дороговизна или отсутствие фольгированных подложек ограничивает диапазон конструктивных решений.

ЗАВИСИМОСТЬ АМПЛИТУДЫ $\Delta\phi$ ОТ МАТЕРИАЛА ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЭЛЕКТРОДА

В ходе исследований проведены измерения на полупроводниковых пленках трех составов – CdS , $\text{Cd}_{0,95}\text{Zn}_{0,05}\text{S}$, ZnS и сопоставлена фоточувствительность образуемых систем.

По мере увеличения ширины запрещенной зоны применяемого полупроводникового материала фоточувствительность системы падает, что, очевидно, обусловлено снижением квантового выхода.

Применение нелегированных электродов на основе твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}$ продемонстрировало их частичную избирательность к коротковолновому излучению (рис. 8). Это обусловлено, в первую очередь, низким значением коэффициента поглощения этих материалов в видимой области спектра, а также небольшим значением толщины применяемых пленок (порядка 200 нм), благодаря чему большая часть видимого излучения проходит сквозь пленку, практически не поглощаясь.

Данный фактор является благоприятным свойством при изготовлении оптопар, эксплуатируемых в условиях световых помех, так как позволяет исключить из конструкции прибора светофильтры и модуляцию детектируемого светового сигнала.

ВЫВОДЫ

1) Определено влияние примесей в составе полупроводниковых пленок CdS на чувствительность структуры полупроводник–электролит к видимому излучению.

2) Изучена зависимость амплитуды $\Delta\phi$ при освещении структуры коротковолновым излучением от состава применяемого электролита. Учтены антикоррозионные свойства добавок восстановителей.

3) Исследована природа продолжительной релаксации потенциала обесточенной цепи после воздействия на полупроводниковую пленку светом. Предложена модель, объясняющая механизм релаксации фотопотенциала.

4) С учетом полученной модели построена альтернативная схема фотосенсора, позволяющая улучшить показатели быстродействия прибора.

5) Продемонстрирована возможность применения структуры CdS-электролит для построения изотропных позиционно чувствительных детекторов.

6) Показано негативное влияние материала противоэлектрода на продолжительность эксплуатации структуры.

Сопоставлены значения максимального $\Delta\phi$ с составом применяемого полупроводникового материала. Продемонстрирована возможность создания фотосенсоров с избирательной чувствительностью к коротковолновому излучению.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор выражает благодарность проф. А. И. Дикусару за обсуждение результатов исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуревич, Ю.Я., Плесков Ю.В., *Фотоэлектрохимия полупроводников*, М.: Наука, 1983. 312 с.
2. *Solar Energy Conversion: Solid-State Physics aspects*, Seraphin В.О. (Ed.), New York: Springer, 1979, 331 с.
3. Zhang, Y., Man, H., Wu, D., Li, R., et al., A generalized in situ electrodeposition of Zn doped CdS-based photoelectrochemical strategy for the detection of two metal ions on the same sensing platform, *Biosensors and Bioelectronics*, 2016, vol. 77, p. 936. doi: 10.1016/j.bios.2015.10.074
4. Demidenko, I.V. and Ishimov, V.M., Electrodeposition of thin cadmium sulfide films from Na_2SO_3 -based electrolyte, *Russ. J. Appl. Chem.*, 2017, vol. 90, no. 8, p. 1225. doi: 10.1134/S1070427217080055
5. Демиденко, И.В., Ишимов В.М., Электрохимическое осаждение сульфида цинка из электролита на основе Na_2SO_3 , *ЭОМ*, 2021, т. 57, № 5, с. 20. doi: 10.52577/eom.2021.57.5.20

6. Demidenko, I.V., Ishimov, V.M., Odin, I.N., Surinov, V.G., et al., Electrochemical growth, optical absorption spectra, and luminescence properties of films of $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ($0 < x \leq 0,042$) solid solutions, *Inorganic Materials*, 2021, vol. 57, no. 10, p. 992. doi: 10.1134/S0020168521100022
7. Ермолович, И.Б., Матвиевская, Г.И., Пекарь, Г.С., Люминесценция монокристаллов сульфида кадмия, легированных различными донорами и акцепторами, *Украинский физический журнал*, 1993, т. 18, № 5, с. 729.
8. Bube, R.H., *Photoconductivity of Solids*, New York: Wiley, 1960. 461 с.
9. Корята, И., Ионы, электроды, мембраны, М.: Мир, 1983. 264 с.
10. Inoue, T., Watanabe, T., Fujishima, A., Honda, K., et al., *J. Electrochem. Soc.*, 1977, vol. 124, no. 5, p. 719. doi: 10.1149/1.2133392
11. Gerischer, H. and Gobrecht, J., On the Power-Characteristics of Electrochemical Solar Cells, *Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie*, 1976, vol. 80, no. 4, p. 327.
12. *Справочник по электрохимии*, под ред. А.М. Сухотина, Л.: Химия, 1981. 488 с.
13. Демиденко, И.В., Ишимов, В.М., *Сенсор селективный к коротковолновому излучению*, ПМР пат. № 527, уд. № 1919. 6 с.
14. Измайлова, В.Н., Деркач, С.Р., Сакварелидзе, М.А., Левачев, С.М., и др., Гелеобразование в желатине и многокомпонентных системах на ее основе, *Высокомолекулярные соединения*, 2004, т. 46, № 12, с. 2216.
15. Манаев, Е.И., *Основы радиоэлектроники*, М.: Радио и связь, 1985. 504 с.
16. Скорлетти, В.В., *Теоретическая электрохимия*, Л.: Госхимиздат, 1963. 589 с.
17. Демиденко, И.В., Ишимов В.М., *Сенсор селективный к коротковолновому излучению*, ПМР пат. № 532, уд. № 1941. 5 с.
18. Демиденко, И.В., Ишимов В.М., *Сенсор селективный к коротковолновому излучению*, ПМР пат. № 534, уд. № 1945, 4 с.
19. Демиденко, И.В., Ишимов, В.М., *Изотропный фотоэлектрохимический позиционно-чувствительный детектор*, ПМР пат. № 536, уд. № 1955. 4 с.
20. Демиденко, И.В., Ишимов, В.М., *Изотропный фотоэлектрохимический позиционно-чувствительный детектор*, ПМР полезная модель № 537, уд. № 2014. 5 с.

Summary

The features of the deviation of the potential of a de-energized circuit at the semiconductor-electrolyte contact, where cadmium and zinc sulfides are used as semiconductor materials, are considered. Models of equivalent electrical circuits explaining the observed phenomena are proposed. Examples of devices implemented on the base of the results of the conducted research are given.

Keywords: photosensor, de-energized circuit potential, semiconductor – electrolyte contact, CdS, ZnS, $\text{Cd}_{0.95}\text{Zn}_{0.05}\text{S}$