

УДК 535.37+621.383.4+546.23.48

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЗИЦИОННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРИ ОПТИЧЕСКОМ ЗОНДИРОВАНИИ ФОТОПРИЕМНОГО ЭЛЕМЕНТА НА ОСНОВЕ ВЫСОКООМНЫХ СЛОЕВ CdSe

© 2023 г. В. И. Чуки́та^{1, *}, А. В. Воронов¹, М. В. Чуки́чев², В. С. Фе́щенко³

¹Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко,
ул. 25 Октября, 107, MD-3300 Тирасполь, Приднестровская Молдавская республика

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

³Российский технологический университет МИРЭА,
пр. Вернадского, 78, Москва, 119454 Россия

*e-mail: chykita@mail.ru

Поступила в редакцию 27.04.2023 г.

После доработки 25.10.2023 г.

Принята к публикации 27.10.2023 г.

Впервые найдено, что выходное напряжение, координатная и спектральная чувствительность фотоприемного элемента, изготовленного на основе высокоомных светочувствительных слоев CdSe, уменьшаются по гиперболическому закону при увеличении толщины слоев в пределах 6–60 мкм и линейно возрастают при увеличении входного электрического тока. Установленные в работе высокие значения координатной и спектральной чувствительности (70.8 мВ/(мм мкА мВт) и 375 мВ/(мкА мВт) соответственно), которые существенно превышают аналогичные характеристики слоев теллурида кадмия, свидетельствуют о перспективности использования высокоомных слоев CdSe в качестве материала для позиционно-чувствительных фотоприемников.

Ключевые слова: фотоприемный элемент, оптическое зондирование, выходное напряжение, координатная и спектральная чувствительность

DOI: 10.31857/S0002337X23110039, EDN: BPVFXG

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа является продолжением исследований характеристик позиционной чувствительности фотоприемников, изготовленных на основе слоев селенида кадмия [1, 2]. Полупроводниковые позиционно-чувствительные фотоприемники (ППЧФ), в которых светоприемным элементом являются однородные слои полупроводника, предназначены для регистрации и преобразования в аналоговый или цифровой электрический сигнал информации о перемещениях светоизлучающих объектов, обнаружения источника излучения, бесконтактного определения расстояния, определения линейных и угловых координат облученной области в режиме реального времени [3–6].

В работах [7–10] в качестве материала для ППЧФ были исследованы слои теллурида кадмия, однако они имеют относительно низкую фоточувствительность в видимом диапазоне спектра. Представляется перспективным использование высокоомных слоев селенида кадмия в качестве светоприемной основы ППЧФ, которые

обладают значительно более высокой фоточувствительностью по сравнению со слоями CdTe. В исследованиях [11–14] были рассмотрены характеристики фотодетекторов, основанных на материале CdSe. В частности, в работе [11] проведен анализ фотоэлектрических свойств CdSe при изменении толщины слоев в интервале от 0.5 до 2.0 мкм. Работы [12–14] фокусировались на исследовании тонкопленочных образцов CdSe с фиксированной толщиной слоев.

Однако следует отметить, что в указанных работах [11–14] не изучено влияние толщины слоев CdSe на фотоэлектрические свойства. Кроме того, в работах [11–14] не рассматривались зависимости позиционной чувствительности фотоприемных устройств от входного тока и толщины слоев.

Лабораторные исследования ППЧФ заключаются в определении характеристик позиционной чувствительности при оптическом зондировании и прохождении входного электрического тока через фотоприемный элемент (ФПЭ) [1, 2, 6–10]. В

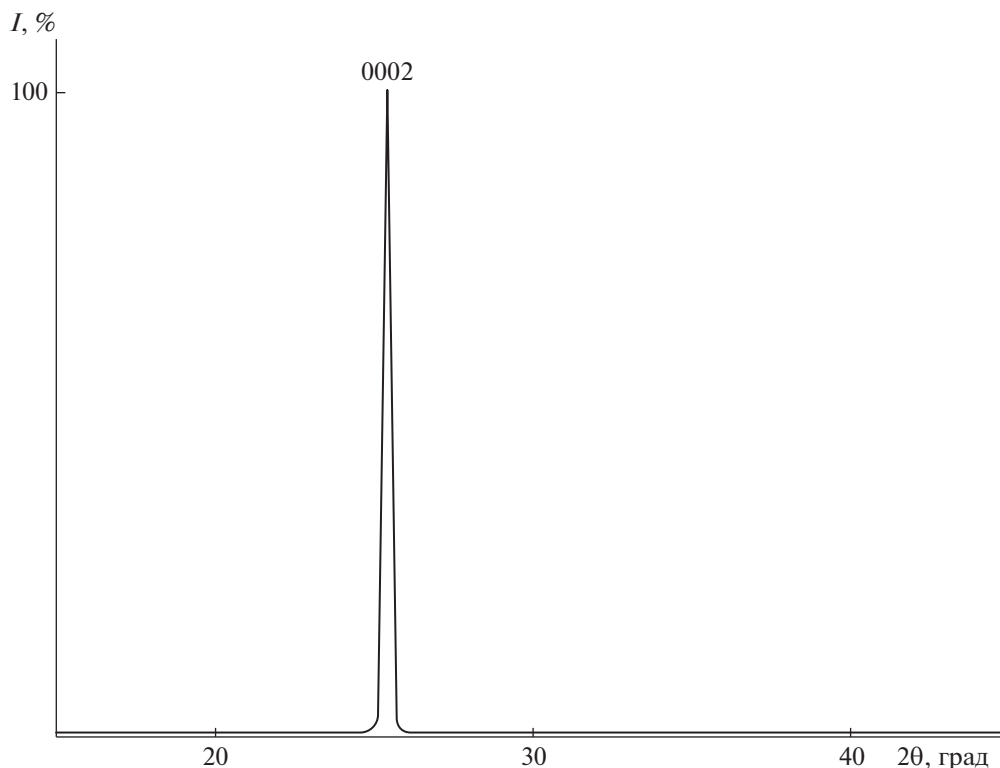


Рис. 1. Дифрактограмма слоев CdSe, выращенных при температуре испарителя 933 К и температуре подложки 853 К [16].

работах [1, 2] характеристики позиционной чувствительности ФПЭ на основе слоев CdSe определяли лишь при единственном значении как величины входного тока, так и толщины слоев. Таким образом, неисследованными являются зависимости выходного напряжения, координатной и спектральной чувствительности ФПЭ на основе слоев CdSe от величины входного тока, а также от толщины слоев в пределах 6–60 мкм; такие данные важны при разработке ППЧФ.

Цель настоящей работы заключается в установлении зависимостей выходного напряжения, координатной и спектральной чувствительности ФПЭ на основе высокоомных слоев CdSe от величины входного электрического тока и от толщины слоев CdSe.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Выращивание и характеристики слоев CdSe.

Синтез CdSe проводили по методике [15, 16], для синтеза использовали кадмий марки Кд-000 и селен марки ОСЧ-22-4, предварительно очищенные перегонкой в вакууме ($p \leq 10^{-4}$ Па). Слои CdSe выращивали методом термического испарения кристаллов селенида кадмия в квазизамкнутом объеме в вакууме на диэлектрической подложке (слюда-мусковит) по методике [15, 16]. Слои CdSe

выращивали в форме диска радиусом 9 мм. Толщину слоев d определяли цифровым микрометром Shahe 25 с погрешностью ± 1 мкм; значения d варьировались в пределах 6–60 мкм. Фазовый состав и состояние поверхности слоев исследовали методом рентгенофазового анализа на дифрактометре ДРОН-4 ($\text{CuK}_{\alpha 1}$ -излучение) без разрушения слоев [16]. Выращенные слои были текстурированными, имели кристаллическую структуру вюртцита (стабильная модификация CdSe). На типичной дифрактограмме слоев CdSe имеется одна линия 0002 (рис. 1): они характеризуются единственной текстурой (0001) [16].

Электрофизические характеристики слоев определяли при температуре 298 К по методикам, приведенным в работе [16]. Темновое удельное электросопротивление ρ слоев находилось в пределах $(1-20) \times 10^9$ Ом см (погрешность в определении ρ составила менее 10%). Слои CdSe обладали предельно низкой концентрацией носителей тока (электронов) $(5-10) \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и имели высокую фоточувствительность, значения кратности фототклика при освещенности 200 лк интегральным светом находились в пределах $(1-3) \times 10^4$.

Спектральное распределение фотопроводимости слоев исследовали при 298 К в диапазоне энергии фотонов от 1.24 до 2.5 эВ и освещенности

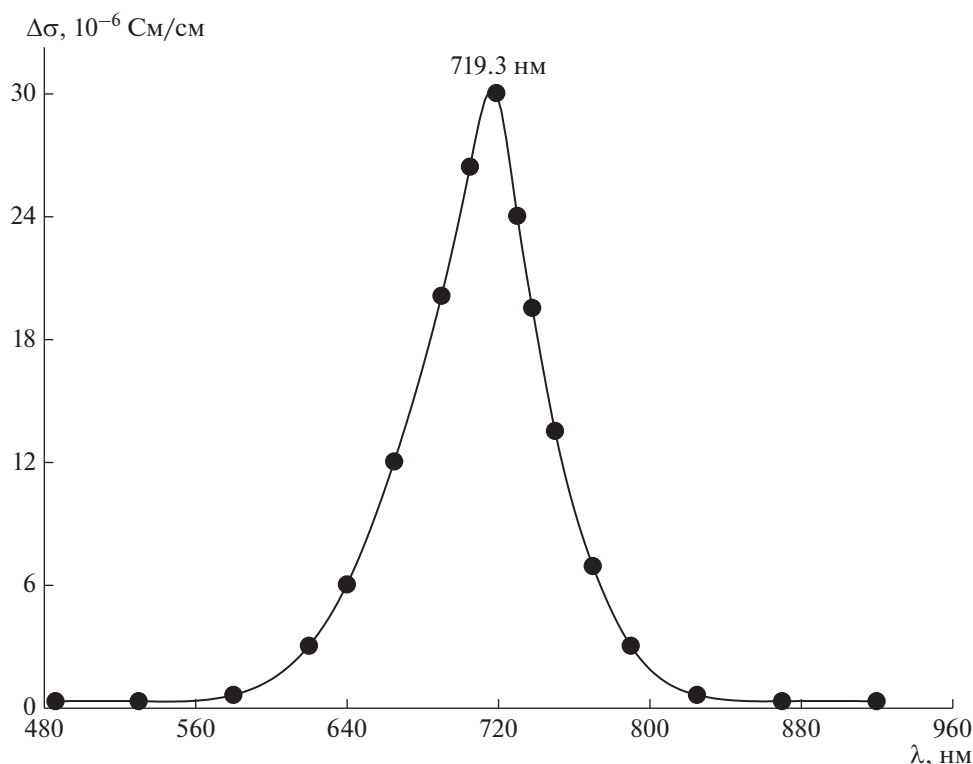


Рис. 2. Спектр фотопроводимости слоев CdSe при 298 К, выращенных при температуре испарителя 933 К и температуре подложки 853 К [17].

200 лк. Определяли приращения световой удельной электропроводности $\Delta\sigma$ слоев по отношению к темновой проводимости. В спектрах фотопроводимости слоев CdSe (рис. 2) наблюдается один пик с максимумом 719.7 нм, соответствующий ширине запрещенной зоны E_g (298 К) селенида кадмия, равной 1.723 эВ [17]. Максимумы фотопроводимости, обусловленные примесями, не обнаружены. ФПЭ изготавливали на основе фоточувствительных высокоомных слоев CdSe.

Методика определения выходного сигнала ФПЭ.

На боковую поверхность диска CdSe (1) в вакууме нанесены омические индиевые контакты, располагающиеся в вершинах квадрата ABCD (рис. 3). Стабилизированное напряжение постоянного тока подается к контактам A, C, и через ФПЭ пропускается входной ток I_{in} . Поток монохроматического лазерного излучения направляли перпендикулярно поверхности ФПЭ, фокусировали линзой 2; после прохождения через механический прерыватель 3 поток создает световое пятно F на диске CdSe (1).

При засветке в слое CdSe генерируются избыточные носители тока, уменьшается электросопротивление, происходит разбаланс цепи интегрального электрического моста с возникновением разности потенциалов U_{BD} . С контактов B и D,

расположенных на эквипотенциальной линии тока, снимается выходное напряжение U_{BD} , возникающее при локальной засветке поверхности ФПЭ. Без засветки выходное напряжение равно нулю. Величина выходного сигнала (выходное напряжение U_{BD}) является характеристикой позиционной чувствительности ФПЭ к падающему свету [1, 2, 6–10]. Оптическое зондирование поверхности ФПЭ осуществляли лучом твердотельного лазера марки LD–67005W с длиной волны 630 нм. Источник излучения был закреплен на двухкоординатном столике, который обеспечивал возможность его перемещения во взаимно перпендикулярных плоскостях с шагом 0.1 мм, а поворотный механизм позволял перемещать по окружности с точностью 1°. Таким способом изменяли значения модуля радиус-вектора пятна засветки r_0 . Исследования проводили для различных значений координаты засветки r_{00} (безразмерный радиус при оптическом зондировании): $r_{00} = r_0/R$, где R — радиус диска CdSe.

Во всех исследованиях интенсивность локальной засветки составляла 1×10^3 лк. Все характеристики снимали при температуре 298 К. Выходной сигнал U_{BD} измеряли с помощью приборов, имеющих чувствительность порядка 1×10^{-3} В; отно-

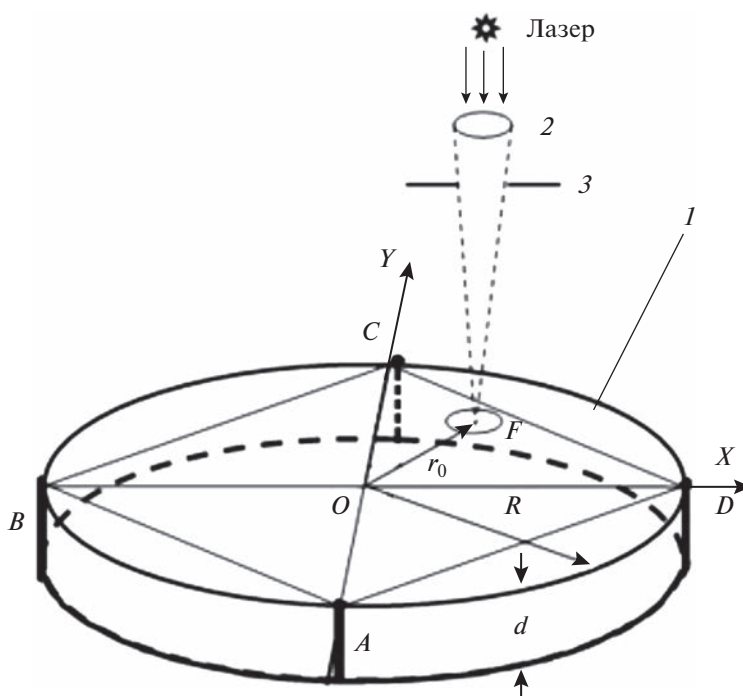


Рис. 3. Схема расположения электрических контактов и светового пятна на поверхности фотоприемного элемента при оптическом зондировании: 1 — диск CdSe с радиусом R и толщиной d ; A, B, C, D — контакты; 2 — фокусирующая линза; 3 — механический прерыватель; O, X, Y — начало и оси координат; r_0 — радиус окружности оптического зондирования; F — пятно засветки.

сительная погрешность при измерении U_{BD} не превышала 0.1% (в диапазоне 0.2–13 В). При измерении величины входного тока погрешность не превышала 0.2% (в диапазоне 0.2–2.2 мкА).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные зависимости выходного напряжения U_{BD} ФПЭ от толщины слоев CdSe. В ФПЭ с площадью активной поверхности $S \geq 200 \text{ мм}^2$ расстояния между электрическими контактами l составляют достаточно большую величину ($l \geq 9 \text{ мм}$); площадь самих контактов, располагаемых на боковой поверхности слоя, должна быть значительно меньше площади всей его боковой поверхности [8]. Выполнение указанных размерно-композиционных требований приводит к тому, что ФПЭ должен изготавливаться на основе толстых слоев ($d \geq 6 \text{ мкм}$). Зависимости выходного напряжения U_{BD} от толщины слоев CdSe представлены на рис. 4. Кривые построены при фиксированном значении безразмерного радиуса $r_{00} = 0.70$ для трех значений входного тока. Зависимости $U_{BD} = f(d)$ хорошо аппроксимируются по гиперболическому закону (рис. 4).

Как уже упоминалось ранее, исследования в работах [11–14] были проведены на тонкопленоч-

ных образцах CdSe, где достигли максимальных значений фотоэлектрических характеристик при изменении толщины слоев в диапазоне от 0.5 до 2.0 мкм. Мы обнаружили, что максимальное выходное напряжение достигается у образцов с тонкими слоями CdSe, а именно, 6 мкм (см. рис. 4). Для разработки фотоприемных устройств с координатной и спектральной чувствительностью на основе слоев CdSe нам потребовалось провести исследования при толщинах слоев в интервале от 6 до 60 мкм. Однако с уменьшением толщины слоев CdSe значительно возрастает удельное электросопротивление, что в свою очередь требовало использования более высокого напряжения от источника питания. Чтобы избежать нежелательных явлений при работе фотоприемных устройств, мы выбрали толщину слоев CdSe, при которой напряжение от источника питания не превышало 19 В, а именно: $d = 20 \text{ мкм}$.

Экспериментальные зависимости выходного напряжения U_{BD} ФПЭ CdSe от входного тока и координаты пятна засветки. На рис. 5 представлены зависимости выходного напряжения U_{BD} от величины входного тока I_{in} . Данные получены для слоев толщиной 20 мкм при значениях координаты засветки r_{00} в пределах 0.3–0.9. Зависимости $U_{BD} = f(I_{in})$ описываются линейными функциями (рис. 5).

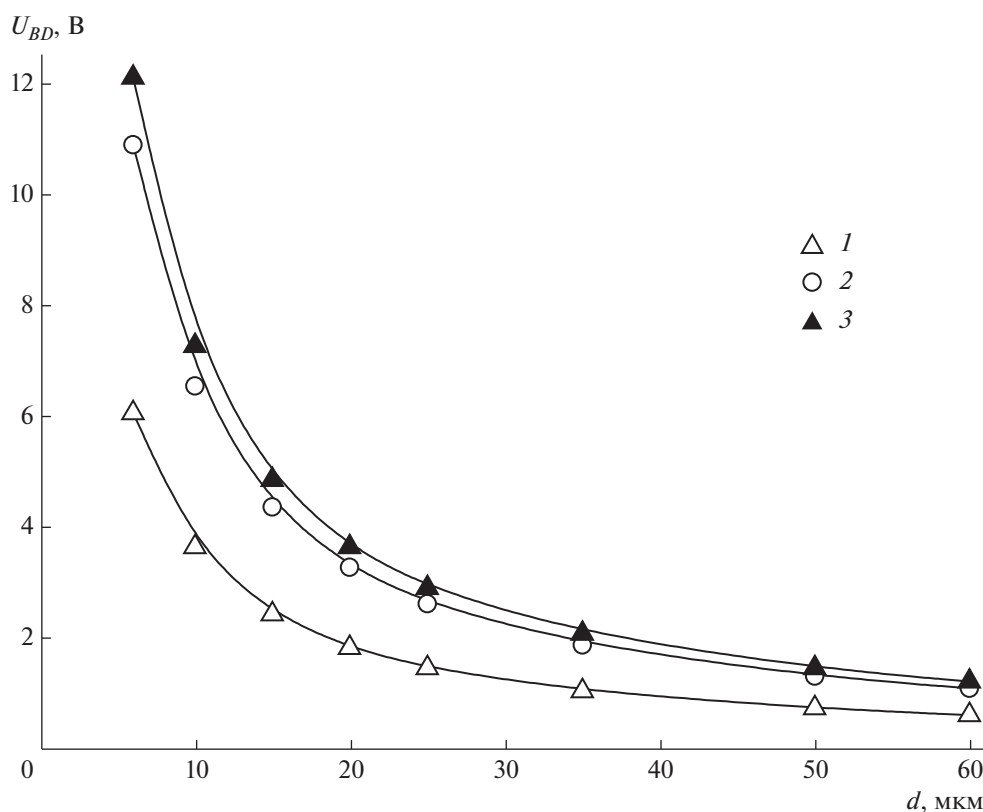


Рис. 4. Экспериментальные зависимости выходного напряжения U_{BD} от толщины слоев CdSe d при значении безразмерного радиуса оптического зондирования $r_{00} = 0.70$ и входном токе 1.00 (1), 1.80 (2), 2.00 мкА (3).

Выбор величины входного тока связан со значениями удельного электросопротивления слоев. У относительно низкоомных слоев теллурида кадмия CdTe электросопротивление было порядка 10^5 Ом см, и значения входного тока были в пределах 10–15 мкА [8]. Слои CdSe являются высокоомными (темновое удельное электросопротивление $(1-3) \times 10^9$ Ом см); увеличение входного тока, например до 10 мкА, потребует значительного повышения напряжения источника питания. Поэтому в исследованиях верхнее значение величины входного тока составило 2 мкА.

На рис. 6 приведены зависимости выходного напряжения U_{BD} от безразмерного радиуса r_{00} при оптическом зондировании ФПЭ. Данные получены для слоев CdSe толщиной 20 мкм при мощности оптического зонда $P = 5$ мВт для значений I_{in} в пределах 1–2 мкА. На всех кривых наблюдается максимум при $r_{00} = 0.78$.

Об эффективности работы фотоприемника судят по величине координатной и спектральной чувствительности.

Экспериментальные данные по координатной и спектральной чувствительности фотоприемника на основе слоев CdSe в зависимости от входно-

го тока. Координатную чувствительность определяли из экспериментальных данных по формуле $\eta = U_{BD}/(\Delta r_0 I_{in} P)$ [9, 10], где $\Delta r_0 = \Delta r_{00} R = [(r_{00})_{\max} - (r_{00})_{\min}] R$; $(r_{00})_{\max} = 0.78$, $(r_{00})_{\min} = 0.20$, $R = 9.0$ мм и $P = 5.0$ мВт – мощность оптического зонда. Значения η рассчитывали для максимального U_{BD} на кривых рис. 6. Координатная чувствительность незначительно увеличивается при повышении входного тока, наблюдается линейная зависимость $\eta = f(I_{in})$ (рис. 7).

При максимальном значении входного тока (2.00 мкА) η составляет 70.8 мВ/(мм мкА мВт). В работе [10] сообщалось о координатной чувствительности ППЧФ на основе слоев n -CdTe:In, равной 15.5 мВ/(мм мкА мВт). Высокие значения координатной чувствительности слоев n -CdSe свидетельствуют о несомненной перспективности фотоприемника на основе слоев селенида кадмия.

Спектральную чувствительность χ ФПЭ определяли из экспериментальных данных по формуле: $\chi = U_{BD}/(I_{in} P)$ [9, 10]. Значения χ рассчитывали для максимальной величины U_{BD} на кривых рис. 6. Спектральная чувствительность линейно возрастает при увеличении входного тока (рис. 7); изменение I_{in} невелико – в пределах 1–2 мкА.

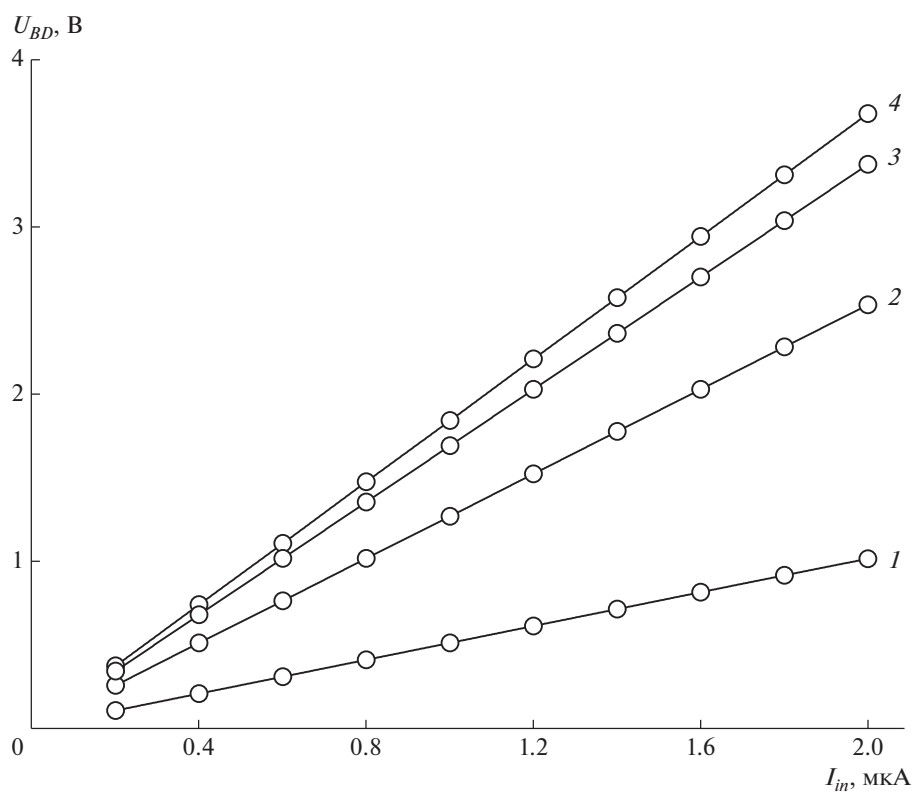


Рис. 5. Экспериментальные зависимости выходного напряжения U_{BD} от величины входного тока I_{in} слоев CdSe при оптическом зондировании для значений безразмерного радиуса r_{00} : 0.30 (1), 0.50 (2), 0.90 (3), 0.78 (4).

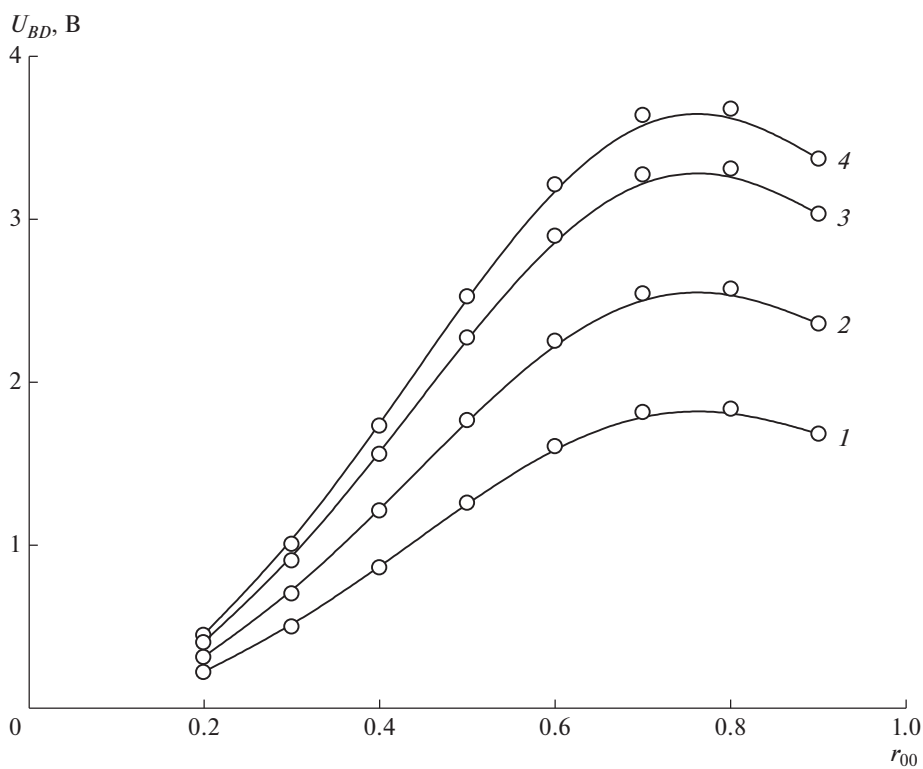


Рис. 6. Экспериментальные зависимости выходного напряжения U_{BD} слоев CdSe от безразмерного радиуса r_{00} при величине входного тока : 1.00 (1), 1.40 (2), 1.80 (3), 2.00 мкА (4).

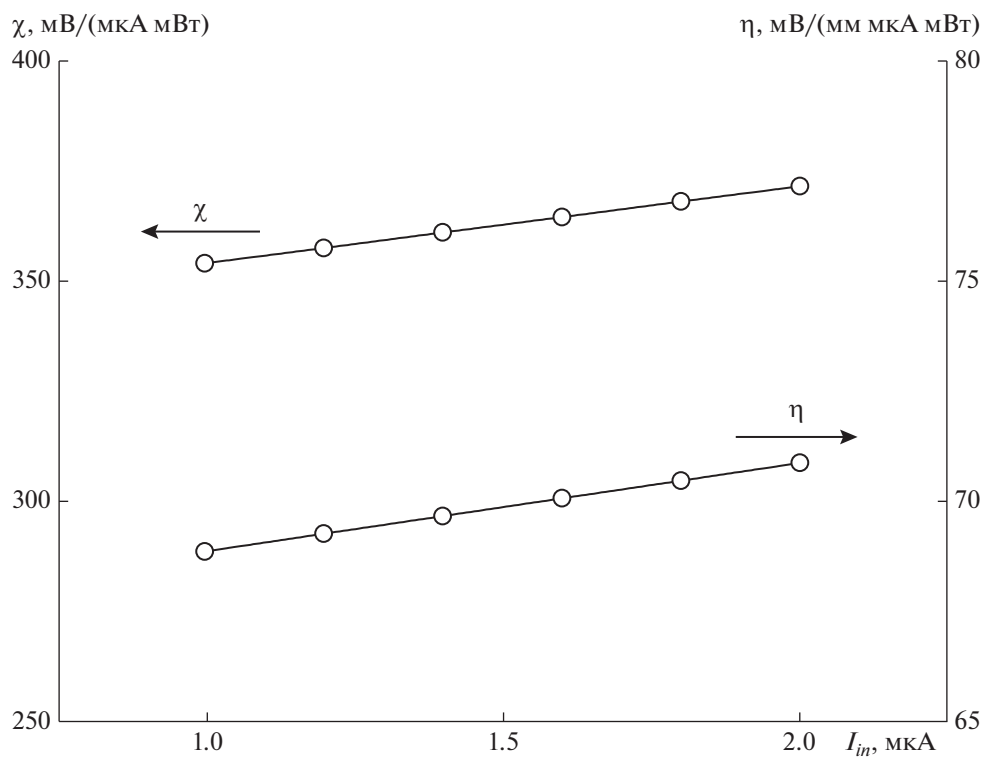


Рис. 7. Зависимости координатной η и спектральной χ чувствительности ФПЭ на основе слоев CdSe от величины входного тока I_{in} .

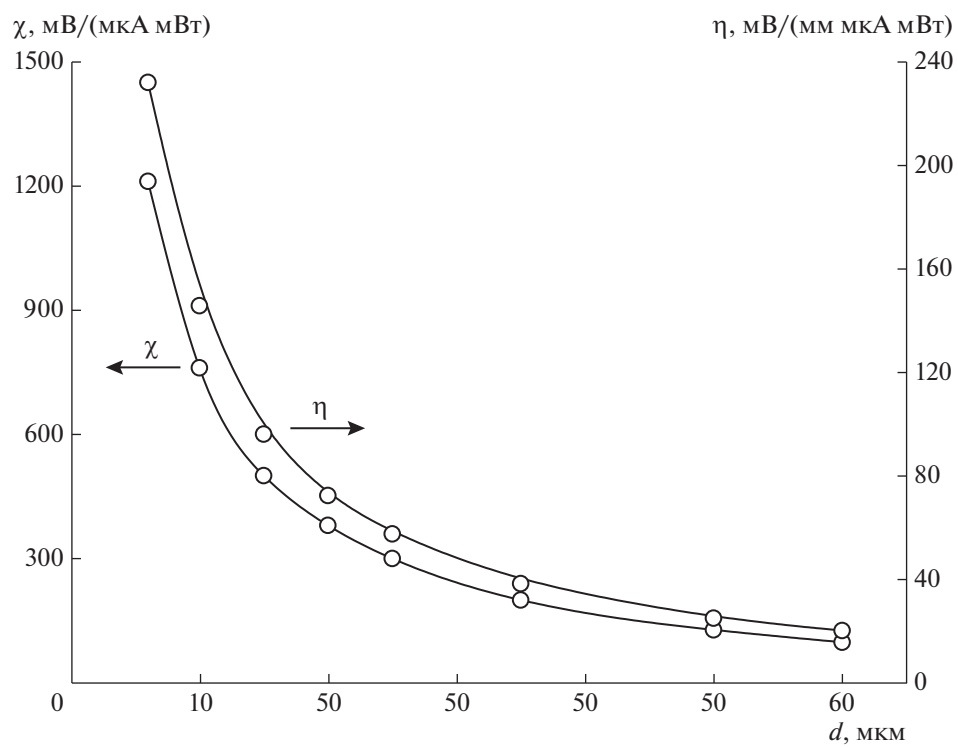


Рис. 8. Зависимости координатной η и спектральной χ чувствительности ФПЭ от толщины слоев CdSe.

При максимальном значении входного тока (2.00 мкА) χ составляет 375 мВ/(мкА мВт). Высокие значения спектральной чувствительности также свидетельствуют о перспективности фотоприемника на основе слоев CdSe.

Таким образом, для ФПЭ, изготовленного на основе высокоомных слоев CdSe, можно использовать величину входного тока в диапазоне от 1 до 2 мкА с тем, чтобы координатная и спектральная чувствительности оставались практически постоянными.

Экспериментальные зависимости координатной η и спектральной χ чувствительности фотоприемника от толщины слоев CdSe. Значения η , χ определены при входном токе 2.00 мкА и $r_{00} = 0.70$. Зависимости $\chi = f(d)$, $\eta = f(d)$ хорошо аппроксимируются по гиперболическому закону (рис. 8), так же как и зависимости выходного напряжения $U_{BD} = f(d)$ (рис. 4).

Наибольшие значения координатной и спектральной чувствительности ФПЭ наблюдаются у образцов с меньшей толщиной слоев CdSe. Однако, как указывалось выше, с уменьшением толщины слоев CdSe существенно возрастает удельное электросопротивление, что нежелательно при функционировании фотоприемника. Полученные данные о зависимости η и χ от d слоев не влияют на сделанный ранее выбор оптимального значения толщины слоев CdSe при функционировании фотоприемника на их основе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определены зависимости характеристик позиционной чувствительности при оптическом зондировании ФПЭ на основе высокоомных слоев CdSe от величины входного тока и от толщины слоев. Впервые установлено, что величины выходного напряжения, координатной и спектральной чувствительности ФПЭ на основе слоев CdSe уменьшаются по гиперболическому закону при увеличении толщины слоев и линейно возрастают с величиной входного тока.

Полученные результаты позволили установить оптимальные значения как входного тока, так и толщины слоев ФПЭ на основе CdSe.

Экспериментальные данные по координатной чувствительности слоев CdSe составили 70.8 мВ/(мм мкА мВт), что в 4 раза выше, чем для слоев CdTe. Значения спектральной чувствительности слоев CdSe (375 мВ/(мкА мВт)) превышали аналогичную характеристику слоев CdTe более чем в 60 раз. Данные результаты свидетельствуют о несомненной перспективности использования вы-

сокомных слоев CdSe в качестве материала для позиционно-чувствительных фотоприемников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сенокосов Э.А., Чукиита В.И., Хамидуллин Р.А. и др. Исследование характеристик позиционной чувствительности эпитаксиальных слоев n -CdSe, выращенных в квазизамкнутом объеме на кристаллах слюды // Неорганические материалы. 2016. Т. 52. № 8. С. 822–825. <https://doi.org/10.7868/S0002337X16080157>
2. Сенокосов Э.А., Чукиита В.И., Хамидуллин Р.А. и др. Экспериментальное и теоретическое исследование характеристик позиционно-чувствительных фотоприемников на основе эпитаксиальных слоев n -CdSe/слюда // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51. № 5. С. 689–694. <https://doi.org/10.21883/FTP2017.05.44430.8406>
3. Fortunato E., Ferreira I., Giuliani F. et al. Flexible Large Area Thin Film Position Sensitive Detectors // Sens. Actuators. 2000. V. 86. P. 182–186.
4. Andersson H.A., Bertilsson K., Thungström G., Nilsson H.-E. Processing and Characterization of a MOS-Type Tetra Lateral Position Sensitive Detector with Indium Tin Oxide Gate Contact // IEEE Sens. J. 2008. V. 8. № 10. P. 1704–1709.
5. Гурин Н.Т., Новиков С.Г., Корнеев И.В. и др. Позиционно-чувствительный фотоприемник для фотоэлектрических преобразователей углов поворота // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. Вып. 6. С. 57–62.
6. Рахимов Н.Р., Минин О.В., Минин И.В., Алижанов Д.Д. Особенности получения координатно-чувствительного приемника оптического излучения на основе полупроводниковых пленок с аномальным фотонапряжением // Автоматика и программная инженерия. 2012. № 2. С. 41–46.
7. Ключанов А.А., Сенокосов Э.А., Сорочан В.В., Цирулик Л.Д. Двухкоординатные фотодатчики на основе однородных проводящих полупроводниковых пленок // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 5. С. 123–125.
8. Ключанов А.А., Сенокосов Э.А., Богинский Д.Е. и др. Функциональные возможности фотоприемников на основе низкоомных полупроводниковых пленок // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2003. № 1. С. 49–51.
9. Сенокосов Э.А., Сорочан В.В. Характеристики позиционно-чувствительных фотоприемников на основе слоев n -CdTe:In // Прикладная физика. 2006. № 2. С. 77–80.
10. Сенокосов Э.А., Сорочан В.В. Координатно-чувствительные фотоприемники на основе полупроводниковых слоев n -CdTe:In // Вестн. Мордовского ун-та. 2007. № 3. С. 103–109.
11. Nasir E.M., Al-Lamy H.K., Abdul-Ameer H.J. Optical Properties of CdSe Films at Different Thickness and Annealing Temperature // Chalcogen. Lett. 2019. V. 16. P. 485–497.

12. *Mahato S., Kar A.K.* The Effect of Annealing on Structural, Optical and Photosensitive Properties of Electrodeposited Cadmium Selenide Thin Films // *J. Sci.: Adv. Mater. Devices*. 2017. V. 2. P. 165–171.
13. *Shelke N.T., Karle S.C., Karche B.R.* Photoresponce Properties of CdSe Thin Film Photodetector // *J. Mater. Sci.: Mater. Electron*. 2020. V. 31. P. 15061–15069.
14. *Olgar M.A., Başol B.M., Polat İ. et al.* Photodetector Properties of CdSe Thin Films Grown by Close Space Sublimation Method // *J. Mater. Sci.: Mater. Electron*. 2023. V. 34. P. 1749–1757.
15. *Сенокосов Э.А., Чукина В.И., Жданов А.А.* Управление технологией выращивания в квазизамкнутом объеме кристаллически совершенных полупроводниковых слоев // *Вестн. Приднестровского ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки*. 2018. № 3. С. 16–19.
16. *Чукина В.И., Сенокосов Э.А., Суринов В.Г. и др.* Спектры экситонной люминесценции и электрофизические характеристики фоточувствительных слоев CdSe, выращенных на слюде в квазизамкнутом объеме // *Неорган. материалы*. 2021. Т. 57. № 7. С. 700–704.
<https://doi.org/1031857/S002337X21070034>
17. *Сенокосов Э.А., Чукина В.И.* Фотоэлектрические свойства эпитаксиальных слоев CdSe, выращенных методом термического напыления в квазизамкнутом объеме на кристаллах (0001) слюды // *Вестн. Приднестровского ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки*. 2016. № 3. С. 36–43.