

08

Создание ультратонкого источника примеси для снижения радиационных потерь фоточувствительных пленок CdS

© С.В. Стецюра, Е.Г. Глуховской, А.В. Козловский, И.В. Маляр

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
410012 Саратов, Россия
e-mail: stetsyurasv@mail.ru

(Поступило в Редакцию 23 июля 2014 г.)

Формирование пленки арахината свинца исследовано на границах раздела водного раствора нитрата свинца с воздухом и с твердой гидрофильной подложкой. Проведена оценка эффективности переноса свинца методом Ленгмюра–Шеффера на полупроводниковую подложку. Сделаны выводы об оптимальных условиях получения монослоев арахината свинца с учетом минимального содержания в них кислорода с целью дальнейшего использования полученных слоев в качестве источника примеси для CdS. Показано, что для достижения оптимального соотношения между фоточувствительностью пленочных образцов CdS и снижением их деградационных потерь при облучении ускоренными электронами достаточно создать в приповерхностном слое толщиной, равной глубине максимальной диссипации энергии ионизирующего излучения, преципитаты PbS радиусом не менее 3 nm.

Введение

Пленочные материалы типа $A^{II}B^{VI}$ востребованы при изготовлении широкого класса устройств микро- и оптоэлектроники, среди которых фотоземельники, солнечные батареи, люминофоры и сенсоры различного назначения [1,2]. В частности, повышенное внимание сегодня уделяется изучению свойств и микроструктуры пленочного материала на основе сульфида кадмия [3,4]. Было показано, что, незначительно изменяя степень гетерогенности такого материала введением узкозонных фаз, например, PbS, можно существенно изменять свойства исходного материала в целом [5,6]. При этом ввиду незначительной взаимной растворимости компонентов CdS и PbS образуется материал, представляющий собой широкозонную фоточувствительную матрицу с преимущественным содержанием CdS ($Cd_xPb_{1-x}S$, $x > 0.99$) и узкозонные включения с преимущественным содержанием PbS ($Pb_yCd_{1-y}S$, $y > 0.94$). Такой материал обладает высокой стабильностью характеристик при облучении электронами средних энергий, в то время как аналогичная поглощенная доза приводит к значительной деградации поликристаллического CdS без добавления PbS [7]. В [8] была продемонстрирована зависимость радиационной стойкости гетерофазного полупроводника CdS–PbS от режимов термического отжига (времени и температуры). Также было проведено сопоставление режимов отжига с изменением фазового состава и морфологии поверхности образцов и, как следствие, изменениями электрофизических, фотоэлектрических и оптических свойств [9–11].

Повышение радиационной стойкости при введении узкозонной компоненты в широкозонную матрицу объясняется модельными представлениями, введенными в [12] и далее развитыми в [13]. Исходя из многочисленных экспериментальных и теоретических исследований, показавших, что электроны с допороговыми энергиями

приводят в полупроводниках к образованию дефектов по примесно-ионизационному механизму и протеканию радиационно-стимулированной диффузии, следует, что наличие геттеров (стоков) точечных дефектов может снизить деградацию свойств или даже привести к некоторому улучшению параметров материала (эффекту малых доз) [7,14].

Проведенная с использованием формулы Канай–Окаямы [15] оценка глубин максимальной проникновения и максимальной диссипации энергии ускоренных электронов показала, что в CdS глубина, на которой происходит максимальное дефектообразование, для электронов с энергией 20 keV не превышает 0.6 μm . Таким образом, электронное облучение поглощается и, как следствие, существенно влияет лишь на приповерхностный слой полупроводника.

Ранее для повышения радиационной стойкости предлагалось создавать геттерные области PbS во всем объеме полупроводника CdS [7,12], что приводило к некоторому уменьшению фоточувствительности ввиду увеличения рекомбинационного потока неравновесных носителей заряда в узкозонную фазу. Поэтому представляется перспективным создание геттерных стоков только в приповерхностной области, где образуются радиационные дефекты и происходит радиационно-стимулированная диффузия.

Возможность модификации приповерхностного слоя наноразмерной толщины была продемонстрирована в [16], где описано создание p – n -перехода на глубине менее 5 nm в результате диффузии примеси при отжиге из органического покрытия, содержащего электрически активную примесь. В [17] нами опубликованы результаты, демонстрирующие получение гетерофазного слоя в результате диффузии слабо растворимого компонента с поверхности CdS из ограниченного источника (наноразмерного слоя арахината свинца).

В рамках настоящей работы проводится оценка доли объемного содержания включений узкозонной фазы PbS, их параметров, а также толщины гетерофазного слоя, необходимых для обеспечения радиационной стойкости поликристаллической пленки CdS толщиной 1–2 μm . Для управляемой модификации структуры и свойств приповерхностного слоя CdS используются наноразмерные слои арахината свинца, необходимым требованием к которым является равномерное распределение атомов металла в слое, способных полностью продиффундировать („уйти с поверхности“) за время отжига в объем CdS в количестве, превышающем предельную растворимость PbS в CdS [9,18,19] на заданной глубине. Для достижения этой цели были дополнительно проведены исследования монослоев арахината свинца, полученных при разных условиях эксперимента, как на поверхности водной субфазы, так и после переноса на полупроводниковую подложку, позволившие оценить изменения однородности морфологии и химического состава получаемых покрытий.

1. Технология получения и характеристика гибридных структур

Для исследований были подготовлены поликристаллические образцы CdS толщиной 1–2 μm , полученные термическим испарением в вакууме на слюдяные подложки [20]. На их поверхность по методу Ленгмюра–Шеффера наносилось разное количество монослоев арахината свинца, которые служили в качестве источника легирующей примеси (Pb) для пленки CdS. Ранее (например в [6,21]) было показано, что наличие свинцовой примеси может уменьшать как технологическую, так и радиационную дефектность полупроводниковых пленок.

После нанесения покрытия из арахината свинца на пленки CdS проводилась сенсibilизация последних путем отжига при температуре $545 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение 10–20 min на воздухе.

1.1. Технология получения монослоев

Для формирования монослоев на водной поверхности и их переноса на твердые подложки использовалась ленгмюровская ванна KSV-Nima LB Through Medium KN 1003 (KSV-Nima, Финляндия). Технология Ленгмюра позволяет формировать монослои (МС) поверхностно активных веществ (ПАВ) на границе раздела фаз жидкость–газ с гарантированной толщиной в одну молекулу. МС могут играть роль органической матрицы, в состав которой можно включать функциональные элементы. Перенос единичного МС такой матрицы с включениями обеспечивает соответственно монослойный перенос функциональных элементов. Эта особенность формирования монослоев использовалась для дозированного переноса атомов свинца, каждый из которых связывается с двумя молекулами ПАВ. В наших

экспериментах в качестве вещества органической матрицы было использовано ПАВ из класса жирных кислот — арахидиновая кислота. Выбор арахидиновой кислоты обусловлен тем, что монослои этого вещества достаточно хорошо изучены. Длина углеродной цепи обеспечивает ее практически полную нерастворимость в воде. Все это определяет получение стабильного во времени МС с высокой упорядоченностью молекул в слое, что в свою очередь позволяет получать высокую воспроизводимость процессов формирования и переноса МС.

Присутствие ионов свинца в водной субфазе способствует формированию твердокристаллического состояния монослоя минуя, жидко-расширенное состояние. Другими словами, ионы свинца оказывают дополнительное влияние на плотность упаковки монослоя на поверхности водной субфазы. Связываясь с молекулами арахидиновой кислоты, Pb может образовывать различные типы солей (нормальные и основные) в зависимости от *pH* рабочего раствора [22]. В качестве источника ионов свинца для раствора была использована свинецсодержащая соль с хорошей растворимостью в воде — нитрат свинца.

В ранее опубликованных нами работах [23,24] были представлены результаты исследований МС арахината свинца на поверхности воды методом изотерм сжатия и на поверхности полупроводника — методом вторично-ионной масс-спектрометрии. В этих работах также была продемонстрирована зависимость формирования солей арахината свинца и свинецсодержащих кластеров в мультислойных пленках на твердых подложках от условий получения (в частности, описано получение металлосодержащих включений в виде дендритов и кластеров). Но эти работы не содержали сведений о равномерности структурирования металлом органической пленки, изменений морфологии и химического состава монослоя при переносе с поверхности водной субфазы на полупроводниковую подложку.

Исходя из результатов ранее проведенных исследований, в рамках настоящей работы были реализованы эксперименты для следующих условий: содержание нитрата свинца в водной субфазе на уровне концентрации 10^{-3} mol/l, вариации кислотности (*pH*) водной субфазы в диапазоне 4.0–10.25.

Проведение таких исследований позволяет выбрать режим получения, гарантирующий равномерность распределения легирующей примеси по поверхности подложки. Кроме того, одновременное использование в эксперименте нескольких взаимодополняющих физических методов позволяет получить более полное представление о происходящих в пленках фазово-структурных изменениях.

1.2. Характеристика монослоев на границе раздела раствор–воздух

МС на поверхности водной субфазы в процессе сжатия исследовались с помощью брестерской микроскопии на микроскопе ВММ 2 plus (NFT, Германия),

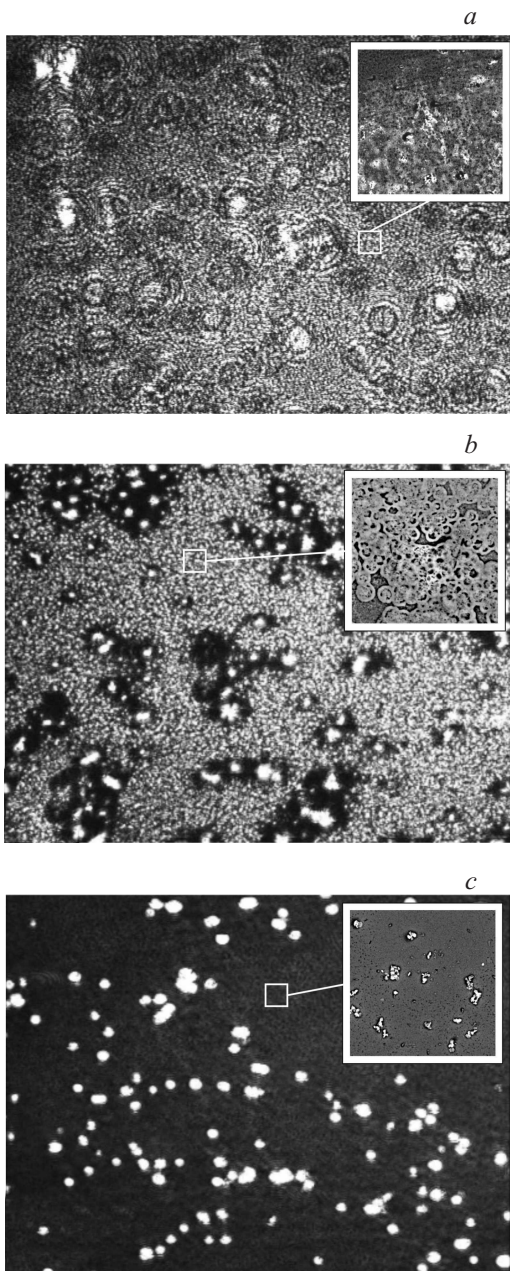


Рис. 1. Микроизображения сформированных монослоев арахиата свинца на поверхности водной субфазы при концентрации нитрата свинца $C = 0.001 \text{ mol/l}$ и различных pH : *a* — 4.05, *b* — 7.8, *c* — 10.25. Изображения размером $760 \times 570 \mu\text{m}$ получены с помощью брестеровской микроскопии. На угловых вставках размером $30 \times 30 \mu\text{m}$, полученных с помощью сканирующей электронной микроскопии, показана морфология поверхностей полупроводниковых подложек после переноса на них соответствующих монослоев арахиата свинца.

оснащенном твердотельным лазером Nd : YAG в качестве источника, работающим на второй гармонике с длиной волны 532 nm и мощностью 50 mW . Оптический объектив с 20-кратным увеличением позволял получать латеральное разрешение до $1 \mu\text{m}$. Площадь визуализации поверхности составила $760 \times 570 \mu\text{m}^2$.

На рис. 1 представлены микроизображения сформированных слоев арахиата свинца на поверхности водной субфазы с одной концентрацией нитрата свинца ($C = 0.001 \text{ mol/l}$), полученных в момент достижения поверхностного давления $\pi = 20 \text{ mN/m}$, но при разных значениях pH раствора. Представленные результаты демонстрируют существенную зависимость однородности структуры и состава образованного МС от pH раствора: при увеличении pH происходит укрупнение центров рассеяния поляризованного света лазера, что свидетельствует о более интенсивном образовании металлосодержащих кластеров и изменение их размеров. Это в свою очередь существенно влияет на степень упорядоченности и однородности МС. Так, образование кластеров не менее $1 \mu\text{m}$ в диаметре происходит при pH среды, равном 7.5 и выше. В кислой субфазе кластеры визуальнo не регистрируются, но с $pH = 4$ и выше вид изотерм сжатия показывает [22,23], что в МС образуется нормальная соль — арахиат свинца. В щелочной среде (pH более 10) регистрируются только крупные конгломераты, и наблюдается нарушение сплошности МС.

1.3. Характеризация монослоев, перенесенных на подложку

Для контроля эффективности переноса свинецсодержащих МС по методу Ленгмюра–Шеффера на поверхность CdS и равномерности распределения металла использовался сканирующий электронный микроскоп Mira // LMU от Tescan (Чехия) с приставкой для энергодисперсионного анализа X-Stream от Oxford Instruments (Англия).

Поскольку ранее нами было показано [8], что образование оксидов на поверхности полупроводника CdS–PbS может снижать радиационную стойкость, то в МС арахиата свинца, перенесенном на полупроводниковую подложку, наряду с содержанием свинца контролировалось содержание кислорода.

На угловых вставках рис. 1 представлены изображения МС арахиата свинца на твердой подложке. Сопоставление топологии пленок арахиата свинца на поверхности водной субфазы и на твердой подложке показывает корреляцию морфологии поверхности при соответствующих pH . При этом для МС, полученного в щелочной среде ($pH = 10.25$), наблюдается большая неоднородность после его переноса на твердую подложку, что не отмечается для других слоев, полученных в более кислой среде. Это может быть обусловлено изменением соотношения сил взаимодействия между молекулами внутри монослойного покрытия и сил взаимодействия между молекулами покрытия и подложки/водной субфазы. Ввиду изначальной неоднородности МС (рис. 1, *c*) при переносе на твердую подложку процессы агрегации молекул покрытия оказались более эффективными для МС, полученного при $pH = 10.25$.

Измерения удельного содержания свинца в МС (на единицу площади поверхности образца с участка на

$30 \times 30 \mu\text{m}^2$) с помощью энергодисперсионного анализа показали, что максимальное его количество (до 5.6 wt.%) наблюдается в диапазоне pH от 6 до 9 и выше 11. При этом, начиная с $pH = 9$, наблюдается резкий рост (более чем на 87%) количества кислорода, регистрируемого в составе МС, что связано с образованием в растворе дисперсной фазы гидроксида свинца и, как следствие, образованием гидратированной соли арахината свинца. Поскольку избыток кислорода на поверхности может привести к нежелательному образованию оксидов на поверхности CdS–PbS, а наличие крупных конгломератов приводит к неравномерности распределения свинца по поверхности, то в качестве оптимального для изготовления покрытия был выбран диапазон pH от 6 до 8.

Дальнейшие результаты, приведенные в разд. 2, были получены для $pH = 7.8$.

После нанесения органических МС на поликристаллическую подложку CdS полученные образцы подвергались термическому отжигу на воздухе при $545 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение 10 или 20 min. Времена отжига выбирались приемлемыми для эффективной сенсibilизации пленок CdS толщиной $1\text{--}2 \mu\text{m}$ при заданной температуре отжига. В результате диффузии атомов свинца и его низкой растворимости в CdS происходило образование гетерофазного материала с включениями PbS различных размеров [17].

1.4. Оценка размеров включений PbS

Ранее нами в работе [17] для оценки размеров узкозонных включений PbS для аналогичных образцов была использована модель преципитации при термическом отжиге в результате распада пересыщенного твердого раствора, предложенная в работе [25].

Для моделирования процесса преципитации узкозонных включений PbS в CdS были использованы следующие уравнения:

$$\frac{dN(x, t)}{dt} = -4\pi Db - N^{1-\alpha}(N(x, t) - N_E(x, t) + mN_C - N(x, t))^\alpha, \quad (1)$$

$$\langle i(x, t) \rangle = \frac{1}{N_C} \int_0^T \frac{\partial N(x, t)}{\partial t} dt, \quad (2)$$

$$R(i) = \left(\frac{3V_0 \langle i(x, T) \rangle}{4\pi} \right)^{1/3}, \quad (3)$$

где $dN(x, t)/dt$ — скорость роста скоплений за счет продиффундировавших атомов свинца $N(x, t) = \frac{N_s}{\sqrt{\pi Dt}} \exp(-\frac{x^2}{4Dt})$ на глубину x за время отжига t из поверхностного источника с концентрацией N_s , D — коэффициент диффузии свинца в поликристаллической пленке CdS, N_C — концентрация центров зарождения, m — некоторое начальное число частиц размером b в зародыше, α — параметр, характеризующий геометрическую форму преципитата, $\langle i(x, T) \rangle$ — среднее число

частиц в преципитате, образовавшемся за время T , $R(i)$ — радиус скопления из i частиц, V_0 — объем молекулы преципитата.

Значения D определялись экспериментально из профилей вторично-ионной масс-спектрометрии [17,26] для образцов CdS со слоем арахината свинца на поверхности, отожженных при 450°C в течение 15 min. Поверхностная концентрация N_s рассчитывалась из площади, приходящейся на одну молекулу в МС, на основании изотерм сжатия и количества МС [22].

2. Исследование деградационной стойкости к электронному облучению

2.1. Условия проведения эксперимента, расчет дозы

Одним из распространенных методов оценки деградации фоточувствительных образцов является определение изменения кратности фотосоппротивления до и после воздействия ионизирующего излучения:

$$\delta K = \frac{K_b - K_{af}}{K_b} 100\%, \quad (4)$$

где K_b и K_{af} — кратности фотосоппротивлений до и после облучения ионизирующим излучением соответственно.

Кратность фотосоппротивления рассчитывается как отношение между сопротивлениями в темноте и при фиксированном освещении (1000 lx). Измерения проводили в поперечном режиме фотопроводимости при фиксированном напряжении измерения (в настоящей работе при 10 V).

В качестве ионизирующего излучения использовали низкоэнергетические (20 keV) электроны. При таких энергиях невозможно прямое выбивание атомов из узлов кристаллических решеток, однако активизируется множество процессов. В частности, радиационно-стимулированная диффузия, которая связана с увеличением коэффициента диффузии собственных и примесных атомов в $10^2\text{--}10^{10}$ раз [12,13].

Поглощенная доза оценивалась по формуле

$$D = \frac{dE}{dm} = \frac{N_{ab}E}{q\rho SL} = \frac{i_{ab}tE}{q\rho SR_p}, \quad (5)$$

где N_{ab} — число поглощенных электронов, q — заряд электрона, i_{ab} — поглощенный ток электронов, E — энергия электронов, t — время облучения, ρ — плотность образца, S — площадь облучения, R_p — глубина проникновения электронов, которую можно рассчитать по формуле Канаи—Окаямы [14].

В наших экспериментах образцы с разным числом нанесенных МС арахината свинца и временем отжига облучались ускоренными электронами с энергией 20 keV. При этом поглощенная доза составила 10^9 rad, глубина проникновения электронов $R_p = 2.55 \mu\text{m}$, а глубина максимальной диссипации их энергии — $X_c = 0.58 \mu\text{m}$.

Экспериментальные значения изменения кратности (деградации фоточувствительности) отожженных образцов CdS с покрытием из арахината свинца после облучения электронами с энергией 20 keV (поглощенная доза облучения 109 rad).

Время отжига, s	Число монослоев арахината свинца	Кратность изменения сопротивления при освещении, K	Потери кратности после электрон. облучения, %	Максимальная глубина L образования преципитатов с $R = R_{\text{эф}}$, μm	Радиус R преципитатов у поверхности, nm
600	10	$10^5 - 5 \cdot 10^5$	45–65	0.45	21
1200	10	$10^5 - 5 \cdot 10^5$	40–55	0.63	21.6
600	20	$10^5 - 5 \cdot 10^5$	25–33	0.51	28.6
1200	20	$10^5 - 5 \cdot 10^5$	16–18	0.72	29.3
600	25	$2 \cdot 10^4 - 10^5$	10–12	0.52	31.5
1200	25	$5 \cdot 10^4 - 10^5$	5–6	0.74	32.4
600	35	$10^4 - 10^5$	8–10	0.55	36.6
1200	35	$10^4 - 10^5$	5–6	0.78	37.6
600	50	$10^2 - 10^3$	6–8	0.58	42.9
1200	50	$3 \cdot 10^2 - 10^3$	5–6	0.81	44.1
600	0	$10^5 - 3 \cdot 10^5$	85–90	0	0
1200	0	$10^5 - 3 \cdot 10^5$	90–95	0	0

2.2. Изменение характеристик под действием ускоренных электронов

Оценка радиационной стойкости образцов CdS с различным количеством МС арахината свинца и подвергнутых отжигу на воздухе в течение 10 или 20 min, проводилась по методике, описанной выше. В результате определялись оптимальные режимы для создания фоточувствительных образцов с повышенной стойкостью к электронному облучению.

Результаты, представленные в таблице, в зависимости от времени отжига числа нанесенных МС арахината свинца соотнесены с расчетными значениями среднего радиуса преципитатов у поверхности и максимальной глубины L , на которой образовались преципитаты PbS при заданных технологических условиях.

Размер включений PbS в гетерофазных образцах CdS–PbS оценивался с помощью формул (1–3). Проведенные ранее в [17] расчеты для аналогичных образцов позволили установить корреляцию между размерами узкозонных включений и изменением выхода вторичных ионов во время ионного распыления при дополнительном освещении видимым светом мишени в результате передачи дополнительной энергии узкозонной фазе неравновесными носителями заряда. В результате был определен критический радиус преципитата ($R_{\text{эф}}$), равный 3 nm, при котором происходит эффективное геттерирование неравновесных носителей заряда в CdS–PbS. Исходя из схожести механизмом аномального ВИФЭ [26] и радиационной стойкости гетерофазных полупроводников CdS–PbS [17], в настоящей работе было использовано это значение $R_{\text{эф}}$ в качестве критического для геттерирования точечных дефектов. Таким образом, при расчетах максимальной глубины образования преципитатов L предполагалось, что на этой глубине находятся преципитаты с радиусом не меньшим, чем $R_{\text{эф}}$.

2.3. Анализ изменения кратности фотосопротивления после электронного облучения

Проанализируем изменения кратности фотосопротивления после облучения ускоренными электронами, полученные экспериментально при разных начальных поверхностных концентрациях свинца (количествах МС арахината свинца) и временах отжига. На рис. 2 представлены потери кратности фотосопротивления в зависимости от радиуса преципитатов R на поверхности образцов и максимальной глубины их образования преципитатов с учетом различных времен отжига (600 и 1200 s).

На рис. 2, *a* наблюдается прямая корреляция потерь кратности фотосопротивления от изменения радиуса свинецсодержащих скоплений: чем выше радиус, тем меньше потери. Кроме того, видно, что потери кратности различны при одних и тех же значениях среднего радиуса преципитатов PbS на поверхности CdS, но для разных времен отжига. Они меньше при 1200 s, что можно связать с ростом максимальной глубины L , на которой образуются преципитаты с радиусом $R \geq R_{\text{эф}}$. В отличие от радиуса преципитатов прямая корреляция между потерями кратности фотосопротивления и максимальной глубиной образования преципитатов отсутствует (рис. 2, *b*). Это можно объяснить тем, что глубина максимальной диссипации энергии электронов с энергией 20 keV ($0.58 \mu\text{m}$) приблизительно совпадала с глубинами образования преципитатов ($0.45 - 0.8 \mu\text{m}$).

Поэтому для учета сразу двух параметров (радиуса преципитатов и глубины, на которой они образуются) с помощью формул (1)–(3) были рассчитаны зависимости радиуса преципитатов от глубины, а также доля объема, занимаемая ими в слое толщиной, равной глубине максимальной диссипации энергии электронов, т. е.

$X_c = 0.58 \mu\text{m}$. На рис. 3 представлена зависимость потерь фотократности от объемной доли преципитатов PbS в пленке толщиной $0.58 \mu\text{m}$. Полученные данные хорошо аппроксимируются экспонентой. Из представленных данных видно, что снижение фотократности при облучении низкоэнергетическими электронами наблюдается при превышении объемной доли 0.01%.

Таким образом, можно сделать вывод, что для увеличения радиационной стойкости достаточно создать геттерирующие области только в приповерхностном слое, где происходит основное поглощение ионизирующего излучения. Модификация поверхности CdS ленточными МС на основе арахината свинца с последующим отжигом всей структуры при $545 \pm 5^\circ\text{C}$ приводит к повышению ее радиационной стойкости на порядок и более при облучении электронами с допороговыми энергиями (до 20 keV) и наборе поглощенной дозы до 109 rad. Полученный результат является сопоставимым, а при определенных режимах превосходит ранее достигнутые результаты [7] для поликристаллических образцов CdS–PbS, что выражается в высокой кратности

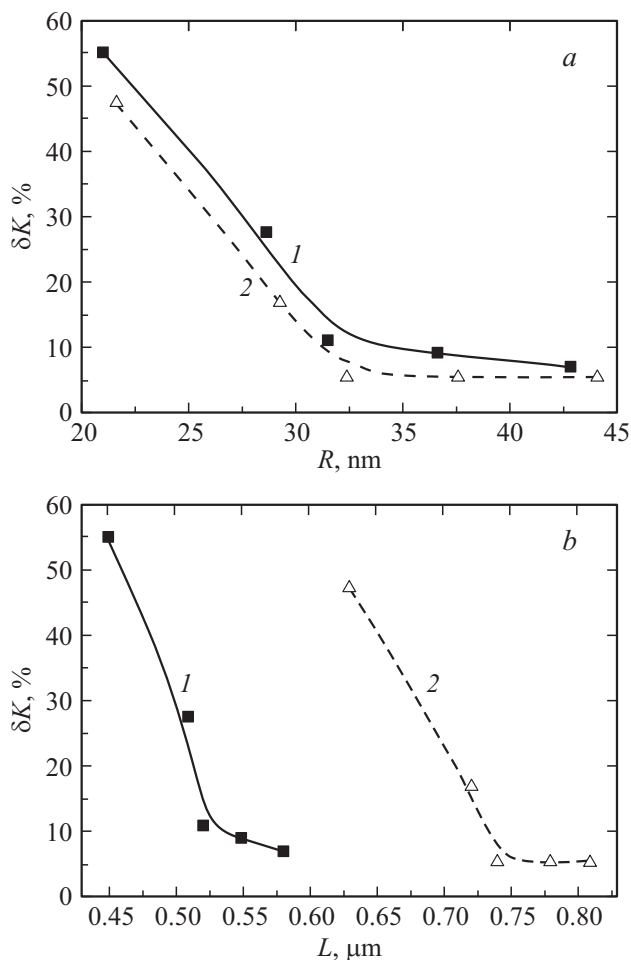


Рис. 2. Зависимость потерь кратности фотосопротивления от радиуса преципитатов R на поверхности (*a*) и от максимальной глубины образования преципитатов L (*b*) в поликристаллических пленках CdS с нанесенными слоями арахината свинца и отожженных при $545 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение 600 с (*1*) и 1200 с (*2*).

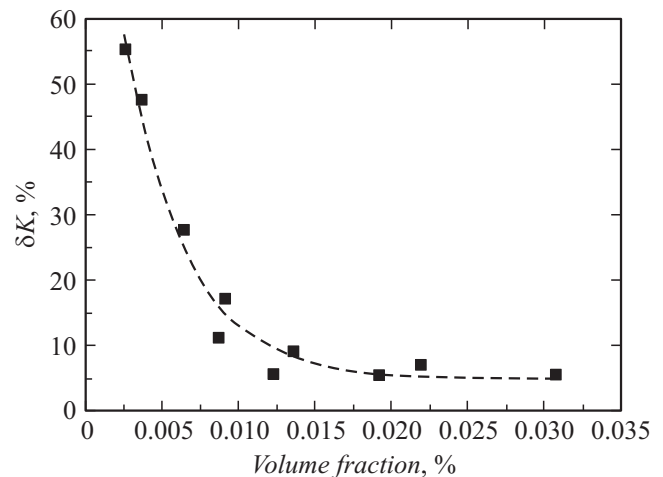


Рис. 3. Зависимость изменения потерь кратности фотосопротивления после электронного облучения от доли объема, занимаемой преципитатами PbS, в пленке CdS толщиной, равной глубине максимальной диссипации ускоренных электронов (в настоящей работе — $0.58 \mu\text{m}$).

фотосопротивления полученных образцов и ее минимальных потерях после электронного облучения.

Заключение

В рамках настоящей работы было исследовано формирование пленки арахината свинца на границе раздела „водный раствор нитрата свинца–воздух“ в зависимости от pH , а также проведена оценка эффективности переноса МС на твердую подложку. В результате были определены оптимальные условия получения МС арахината свинца с целью дальнейшего их использования в качестве источника (диффузанта) свинца с учетом минимизации содержания кислорода в полученном МС.

В результате диффузии атомов свинца во время термического отжига и ввиду низкой растворимости в CdS образуется фоточувствительный гетерофазный материал, обладающий радиационной стойкостью к низкоэнергетическому электронному облучению. Показано, что оптимальное сочетание радиационной стойкости и фоточувствительности достигается при выполнении 2 условий: 1) образование преципитатов с $R > R_{\text{eff}}$ на глубине сравнимой с глубиной максимальной диссипации энергии электронов (для CdS, облучаемой электронами с энергией 20 keV, это $0.58 \mu\text{m}$), и 2) объемная доля преципитатов — геттеров в слое толщиной, равной глубине максимальной диссипации энергии электронов, должна находиться в диапазоне 0.01–0.03%. Нижняя граница диапазона обеспечивает приемлемую радиационную стойкость, а верхняя — достаточную фоточувствительность. Нижнее значение диапазона обусловлено средним расстоянием между преципитатами и скоростью радиационной диффузии. Верхняя граница обусловлена существенным разупорядочением, вносимым PbS в структуру CdS, что ведет к увеличению доли

безызлучательных переходов при освещении, а, с другой стороны — к увеличению скорости рекомбинации.

Таким образом, в рамках настоящей работы был предложен метод создания фоточувствительного гетерофазного материала на основе CdS, обладающего повышенной стойкостью к облучению ускоренными электронами.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 11-08-00529-а и 14-02-31089-мол_а.

Список литературы

- [1] Хрипунов Г.С., Копач В.Р., Мериуц А.В., Зайцев Р.В., Кириченко М.В., Дейнеко Н.В. // ФТП. 2011. Т. 45. Вып. 1, 1564 (2011).
- [2] Ильчук Г.А., Кусьнэж В.В., Рудь В.Ю., Рудь Ю.В., Шаповал П.И., Петрусь Р.Ю. // ФТП. 2010. Т. 44. Вып. 3. С. 335.
- [3] Морозова Н.К., Канахин А.А., Мирошникова И.Н., Галстян В.Г. // ФТП. 2013. Т. 47. Вып. 8. С. 1014.
- [4] Murali K.R., Matheline M., John R. // Chalcogenide Lett. 2009. Vol. 6. N 9. P. 483.
- [5] Чуфаров А.Ю., Форостяная Н.А., Ермаков А.Н., Самигулина Р.Ф., Маскаева Л.Н., Марков В.Ф., Зайнулин Ю.Г. // Журн. неорг. химии. Т. 58. № 10. С. 1362.
- [6] Бухаров В.Э., Роках А.Г., Стецюра С.В. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 3. С. 66.
- [7] Rokakh A.G., Stetsyura S.V., Trofimov N.B., Elagina N.V. // Inorg. Mater. 1999. Vol. 35. N 5. P. 452.
- [8] Маляр И.В., Стецюра С.В. // ФТП. 2011. Т. 45. Вып. 7. С. 916.
- [9] Маляр И.В., Матасов М.Д., Стецюра С.В. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. Вып. 16. С. 42.
- [10] Роках А.Г., Стецюра С.В. // Неорганические материалы. 1997. Т. 33. № 2. С. 198.
- [11] Роках А.Г., Стецюра С.В., Жуков А.Г., Сердобинцев А.А. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 1. С. 58.
- [12] Роках А.Г. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. Вып. 13. Т. 10. С. 820.
- [13] Бухаров В.Э., Роках А.Г., Стецюра С.В. // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 2. С. 93.
- [14] Степанов В.А. // ЖТФ. Т. 68. Вып. 8. С. 67.
- [15] Kanaya K., Okayama S. // J. Phys. D. Vol. 5. P. 43.
- [16] Ho J.C., Ford A.C., Chueh Y.-L., Leu P., Ergen O., Takei K., Smith G., Majhi P., Bennett J., Javey A. // Appl. Phys. Lett. 2009. Vol. 95. P. 072 108–1.
- [17] Стецюра С.В., Маляр И.В., Сердобинцев А.А., Климова С.А. // ФТП. 2009. Т. 43. Вып. 8. С. 1102.
- [18] Китаев Г.А., Марков В.Ф., Маскаева Л.Н. // Неорганические материалы. 1990. Т. 26. № 2. С. 248.
- [19] Томашик В.Н., Грицив В.И. // Диаграммы состояния систем на основе полупроводниковых соединений $A^{IV}B^{VI}$. Киев: Наукова думка, 1982. С. 59.
- [20] Роках А.Г., Кумаков А.В., Елагина Н.В. // ФТП. 1979. Т. 13. Вып. 4. С. 787.
- [21] Воронина Т.И., Лагунова Т.С., Куницына Е.В., Пархоменко Я.А., Васюков Д.А., Яковлев Ю.П. // ФТП. 2001. Т. 35. Вып. 8. С. 941.
- [22] Янкович А.И. // Успехи коллоидной химии. Л.: Химия, 1991. С. 262.
- [23] Вениг С.Б., Стецюра С.В., Глуховской Е.Г., Климова С.А., Маляр И.В. // Нанотехника. 2009. Т. 19. С. 49.
- [24] Stetsyura S.V., Klimova S.A., Wenig S.B., Malyar I.V., Arslan M., Dincer I., Elerman Y. // Appl. Phys. A. 2012. Vol. 109. N 3. P. 571.
- [25] Булярский С.В., Светухин В.В., Приходько О.В. // ФТП. 1999. Т. 33. Вып. 11. С. 1281.
- [26] Сердобинцев А.А., Роках А.Г., Стецюра С.В., Жуков А.Г. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 11. С. 96.