

Влияние параметров узкозонных включений на тип и величину вторично-ионного фотоэффекта в гетерофазных фотопроводниках

© С.В. Стецюра[¶], И.В. Маляр^{¶¶}, А.А. Сердобинцев^{¶¶¶}, С.А. Климова

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
410012 Саратов, Россия

(Получена 11 декабря 2008 г. Принята к печати 18 декабря 2008 г.)

Применение технологии Ленгмюра–Блоджетт при получении гетерофазных поликристаллических пленочных образцов CdS–PbS позволило определить параметры образованных в результате распада пересыщенного твердого раствора CdS и PbS узкозонных преципитатов PbS с использованием методов анализа масс-спектров и математического моделирования. Обнаружена корреляция между размерами преципитатов и величиной вторично-ионного фотоэффекта. На основе экспериментальных данных и результатов моделирования предлагается объяснение впервые обнаруженной смены типа вторично-ионного фотоэффекта с увеличением глубины распыления. Сделан вывод о нелинейной зависимости вторично-ионного фотоэффекта от размеров преципитатов PbS и о существовании минимального среднего размера преципитата, при котором наблюдается влияние узкозонных включений PbS на тип вторично-ионного фотоэффекта.

PACS: 68.49.Sf, 81.07.Bc, 81.15.Cd, 81.15.Lm, 81.30.Mh, 82.80.Ms

1. Введение

В настоящее время широко используются твердые растворы на основе широкозонного полупроводника CdS, основным недостатком которых является низкая деградационная стойкость. Одним из методов повышения деградационной и, в частности, радиационной стойкости является создание стоков дефектов путем введения примесей и последующего отжига полученного материала [1,2]. Эффективным методом повышения деградационной стойкости является также создание гетерофазных материалов с включениями узкозонной компоненты типа PbS [3,4]. PbS имеет очень низкую растворимость в CdS, вследствие чего при превышении порога растворимости происходит распад пересыщенного раствора CdS–PbS с образованием узкозонных включений (преципитатов) PbS. Размер и количество преципитатов зависят от начального соотношения компонент CdS и PbS, а также от условий отжига пленок. Ранее [3,4] было показано, что узкозонные включения PbS в широкозонной матрице CdS являются геттерами дефектов.

Поскольку образование преципитатов и их размер определяющим образом влияют на эффективность геттерирования, то данная работа была направлена на исследование следующих процессов:

- распределение и перераспределение свинца по фоточувствительной широкозонной матрице CdS в процессе отжига с образованием твердого раствора CdS–PbS;
- распад пересыщенного твердого раствора CdS–PbS;
- образование преципитатов PbS.

В качестве основного экспериментального метода исследования использовалась вторично-ионная масс-спектрометрия (ВИМС) с применением импульсной засветки

мишени в процессе ионной бомбардировки. Ранее [5,6] был обнаружен эффект изменения выхода вторичных положительных ионов металла с применением дополнительного воздействия белым светом при бомбардировке пучком первичных ионов кислорода, названный вторично-ионным фотоэффектом (ВИФЭ). Анализ экспериментальных результатов, представленных в данной статье, направлен на установление зависимости ВИФЭ от размера узкозонных включений в материале и основан на модельных представлениях о вторично-ионном фотоэффекте и теоретических расчетах размеров преципитатов.

2. Методика эксперимента

Для масс-спектрометрических исследований использовалась установка на базе масс-спектрометра МИ-1305, снабженная дополнительным окном в камере образцов для подсветки мишени.

Ранее [5,6] была разработана методика, позволяющая регистрировать профиль распределения произвольного элемента в фоточувствительном образце, параллельно регистрируя его реакцию на свет. Так как тип и интенсивность ВИФЭ позволяют судить о наличии узкозонных включений, бомбардировка ускоренными ионами совмещалась с освещением полупроводниковой мишени. Порядок записи массовых пиков, соответствующих исследуемому элементу (свинцу), был следующим: сначала записывались два пика элемента в темноте (темновых пика), затем два пика элемента при освещении белым светом постоянной интенсивности, далее эта последовательность повторялась. По максимумам темновых пиков строился профиль элемента в образце, который далее аппроксимировался полиномом, степень которого подбиралась опытным путем с целью минимизации погрешности аппроксимации. Таким образом, получалась функция, описывающая зависимость выхода вторичных

[¶] E-mail: stetsyurasv@info.sgu.ru

^{¶¶} E-mail: imalyar@yandex.ru

^{¶¶¶} E-mail: serdobintsevaa@info.sgu.ru

ионов из образца от времени, $Y(t)$, соответствующая темновому профилю элемента в образце. После этого, подставляя в функцию значения времени, в которые регистрировались максимумы пиков элемента при освещении образца, получали ожидаемые значения выхода вторичных ионов в темноте и соотносили их с экспериментальными (световыми) значениями Y_0 , используя формулу

$$\delta Y(t) = \frac{Y_0(t) - Y(t)}{Y(t)} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $\delta Y(t)$ — относительное изменение интенсивности выхода вторичных ионов из образца при освещении. Этот параметр можно использовать в качестве меры интенсивности ВИФЭ. Чем больше по модулю данный параметр, тем сильнее проявляется эффект.

Для исследований по данной методике были приготовлены две партии образцов типа CdS–PbS. Первая партия поликристаллических фоточувствительных пленок CdS–PbS была получена термическим испарением исходной шихты, содержащей по массе 90% CdS и 10% PbS, в соответствии с технологическим режимом, описанным в [7]. Отличие образцов в рамках партии состояло в том, что варьировалось время отжига от 5 до 20 мин с целью изучения влияния его длительности на перераспределение примесей и изменение фазового состава. В результате отжига в образцах активировался процесс диффузии содержащихся в них атомов, следствием которого становилось образование преципитатов из атомов одного сорта (Cd или Pb). Так как растворимость PbS в CdS очень мала, ~ 0.6 мол%, то во время отжига происходил распад пересыщенного раствора с образованием преципитатов PbS.

Другая партия образцов гетерофазных пленок CdS–PbS была получена с применением технологии Ленгмюра–Блоджетт (ЛБ). Метод заключался в нанесении на поверхность полученных термическим испарением поликристаллических образцов CdS монослоев арахината свинца из водной субфазы по методу Шеффера, что позволяло очень точно задать поверхностную концентрацию свинца [8]. Во время последующего отжига в течение 15 мин на воздухе при температуре 550°C происходили окисление органики с образованием летучих соединений и диффузия свинца в глубь поликристаллической пленки.

В результате также образовывался твердый раствор CdS–PbS, который в приповерхностных областях, где содержание свинца велико, начинал распадаться с образованием преципитатов PbS. Локализация в начальный момент времени атомов свинца на поверхности и точность в определении их количества позволили использовать при расчете профиля распределения свинца простое решение уравнения диффузии. Для образцов, полученных термическим испарением, это было невозможно, так как PbS в процессе совместного испарения с CdS неравномерно распределялся по толщине пленки (рис. 1).

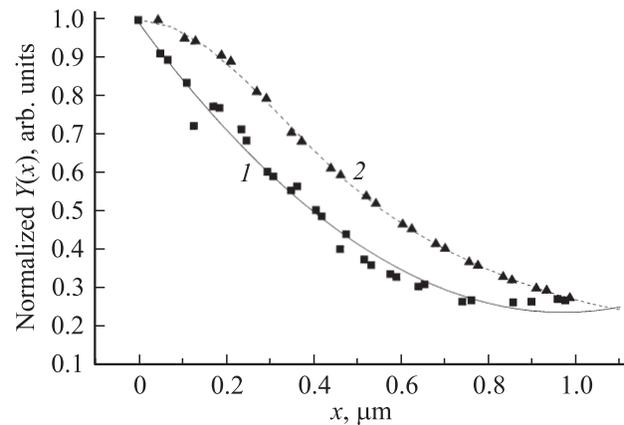


Рис. 1. Зависимости выхода вторичных ионов свинца от глубины распыления (темновые профили распределения свинца) для образца, полученного с применением технологии ЛБ (1), и образца, полученного термическим испарением (2).

При последующем отжиге происходило перераспределение PbS с учетом процессов диффузии, растворения и преципитации, соответственно моделирование процесса кластерообразования в этом случае было затруднено.

Поэтому моделирование процесса кластерообразования было проведено для образцов, полученных с применением технологии ЛБ, как на объектах, дающих возможность наблюдения тех же экспериментальных эффектов, но позволяющих применять более простую модель при расчете.

3. Экспериментальные результаты

Зависимости выхода вторичных ионов свинца от глубины травления (темновые профили) в образцах, полученных термическим напылением с разным временем сенсibiliзирующего отжига, и в образцах, полученных с применением технологии ЛБ, представлены на рис. 1.

Образцы, полученные термическим испарением и отожженные в течение 5–20 мин, имеют профили, которые при приведении к максимальному значению, практически сливаются в одну кривую (расхождение не более 3%). Поэтому на рис. 1 представлен характерный темновой профиль, соответствующий 20 мин отжига.

Для определения относительного изменения выхода вторичных ионов при освещении по методике, описанной выше, была проведена аппроксимация зависимости выхода вторичных ионов свинца от глубины $Y(x)$. Если для образцов, полученных термическим испарением, аппроксимация была проведена полиномом 6-й степени, то для образцов, полученных с применением технологии Ленгмюра–Блоджетт, аппроксимация была проведена функцией Гаусса. В последнем случае диффузия фактически осуществлялась из монослоя арахината свинца толщиной $\sim 25 \text{ \AA}$ [9] с поверхности поликристаллической пленки CdS толщиной $\sim 1 \text{ мкм}$, и можно было

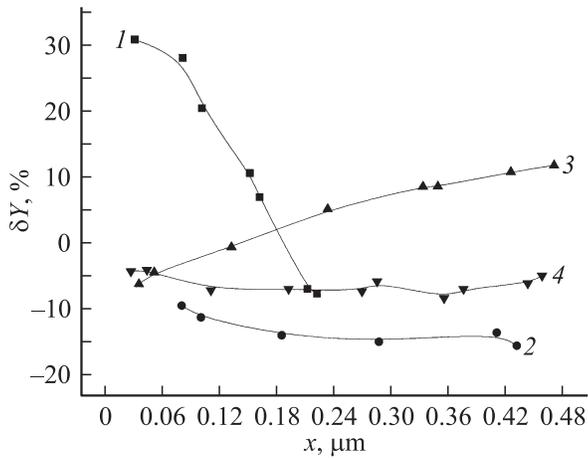


Рис. 2. Зависимости относительного изменения выхода вторичных ионов свинца при освещении образцов от глубины распыления. 1 — образец получен с применением технологии ЛБ; (2, 3, 4) — образцы, полученные термическим испарением и отжигом в течение 5 (2), 10 (3), 20 мин (4).

применить модель диффузии из бесконечно тонкого ограниченного источника, находящегося на поверхности. Решением уравнения диффузии с данными граничными условиями является функция Гаусса вида [10]

$$N(x, t) = \frac{N_s}{\sqrt{4\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right), \quad (2)$$

где $N(x, t)$ — концентрация примеси на глубине x от поверхности после диффузии в течение времени t , N_s — число атомов примеси на поверхности, D — коэффициент диффузии.

Из экспериментальных данных ВИМС для образцов, полученных с применением технологии ЛБ, был рассчитан необходимый на этапе моделирования процесса кластерообразования коэффициент диффузии свинца в поликристаллическом CdS. Он составил $D = 0.38 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2/\text{с}$.

С помощью полученных уравнений аппроксимации $Y(x)$, экспериментально определенных значений $Y_0(x)$ и уравнения (1) были определены относительные изменения интенсивности выхода вторичных ионов $\delta Y(x)$ при освещении в зависимости от глубины распыления. Результаты представлены на рис. 2.

На рис. 2 наблюдается реакция вторичных ионов свинца на освещение белым светом во время бомбардировки пучком первичных ионов кислорода, причем как в сторону увеличения выхода вторичных ионов (аномальный ВИФЭ), так и в сторону уменьшения (нормальный ВИФЭ). Объяснение данного эффекта основывается на представлении о двух конкурирующих механизмах, имеющих место в фоточувствительной пленке в процессе одновременного ионного распыления и освещения [5,6]. При бомбардировке ионами плохо проводящих мишеней происходит зарядка распыляемой поверхности (в данном случае положительная). При освещении образуются

неравновесные носители заряда (в CdS это электроны, так как дырки остаются на глубоких ловушках), которые начинают дрейфовать к заряженной положительно поверхности кратера. Таким образом, увеличивается концентрация электронов на поверхности распыляемой полупроводниковой мишени и возрастает вероятность туннелирования электронов на вылетающие ионы. Это приводит к уменьшению выхода положительных ионов при освещении, т.е. к нормальному ВИФЭ. Наличие узкозонных включений в широкозонной полупроводниковой матрице может приводить к тому, что выход положительных ионов, соответствующих элементу, преобладающему во включениях, будет увеличиваться при освещении образца. Данное явление объясняется накоплением и последующей рекомбинацией генерируемых освещением неравновесных электронов в узкозонных включениях и обозначено как аномальный ВИФЭ. При этом выход положительных ионов, соответствующих элементу, преобладающему в фоточувствительной матрице, будет все так же уменьшаться при освещении.

Ранее данный эффект наблюдался только на образцах, полученных термическим испарением, причем он всегда был либо нормальным, либо аномальным по всей глубине распыления. В данной работе впервые в качестве объекта подобного исследования использовались образцы, полученные с применением технологии ЛБ. В этих образцах интенсивность реакции на свет намного выше (рис. 2). Кроме того, изменение интенсивности ВИФЭ на этих образцах более заметно. Если интенсивность ВИФЭ для образцов, созданных термическим напылением, изменялась с глубиной до 5–17% в зависимости от времени отжига, то на образцах, полученных с применением технологии Ленгмюра–Блоджетт, изменение интенсивности ВИФЭ с глубиной достигало 40%.

На образцах, полученных термическим испарением, наблюдался либо нормальный ВИФЭ по всей глубине распыления, либо смена типа эффекта по мере удаления от поверхности с нормального на аномальный (рис. 2, кривая 3).

На образцах, полученных с применением технологии ЛБ, также наблюдалась смена знака эффекта ВИФЭ: если у поверхности была получена аномальная реакция на освещение, т.е. рост выхода положительных вторичных ионов, то с глубиной интенсивность эффекта резко уменьшалась и его тип менялся на нормальный.

Таким образом, смена типа ВИФЭ в процессе распыления наблюдалась как на образцах, полученных термическим испарением, так и на образцах, полученных с применением технологии ЛБ. Смена типа эффекта могла быть обусловлена существенно различными размерами узкозонных включений. Однако для образцов, полученных термическим испарением, численное моделирование и расчет размеров включений представляют значительную трудность, так как необходимо рассматривать процесс термического испарения двухкомпонентной смеси с разной температурой испарения и различным давлением паров. В связи с тем что затруднительно

экспериментально обеспечить постоянство температуры испарения и давления паров CdS–PbS, а значит, экспериментально проверить модели процессов преципитации для образцов, полученных термическим напылением, для моделирования процессов преципитации в гетерофазной системе CdS–PbS были использованы образцы, полученные с применением технологии ЛБ.

4. Моделирование процесса кластерообразования

Для образцов, полученных с применением технологии ЛБ, было рассмотрено формирование узкозонных включений PbS в результате распада пересыщенного твердого раствора CdS–PbS. Пересыщение твердого раствора происходило, когда концентрация примеси PbS в матрице CdS превышала предел ее растворимости при данной температуре. Распад твердого раствора приводил к снятию пересыщения и сопровождался образованием преципитатов PbS.

Кинетику гетерогенного роста включения PbS можно описать, учитывая процессы захвата и выброса отдельных атомов центром зарождения с помощью соответствующих коэффициентов $k(i)$ и $g(i)$ [11], которые на стадии интенсивного роста преципитатов PbS, когда степень пересыщения большая, связаны следующим образом:

$$g(i) \approx k(i)N_E, \quad (3)$$

где N_E — равновесная концентрация свободных атомов свинца.

Кинетические коэффициенты должны учитывать две стадии процесса: диффузионную и реакционную. Тогда по аналогии с [11] можно записать кинетический коэффициент следующим образом:

$$k(i) = \frac{4\pi D b (i+m)^\alpha}{1 + (i+m)^{\alpha-\beta} (r_0/b) \exp[E(i)/k_B T]}, \quad (4)$$

где D — коэффициент диффузии свободного атома Pb, $E(i)$ — энергия активации захвата Pb на кластер из i частиц, r_0 — период решетки PbS, b — величина порядка расстояния между частицами в скоплении, m — первоначальное число частиц в центре зарождения, k_B — постоянная Больцмана, T — температура, α и β определяются геометрией кластера.

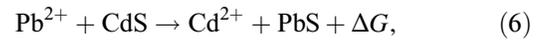
Покажем, что преобладающим в проведенном эксперименте является диффузионный механизм преципитации.

При диффузионном механизме скорость роста скоплений лимитируется диффузией Pb к преципитату. Этот механизм реализуется, если верно следующее неравенство:

$$E(i) < k_B T \ln[b(i+m)^{\beta-\alpha}/r_0]. \quad (5)$$

Реакционный механизм реализуется в том случае, если рост лимитируется скоростью присоединения частиц к поверхности преципитата и неравенство (5) не верно.

Для того чтобы свободный атом свинца присоединился к преципитату, вытеснив атом кадмия в междоузлие, должна пройти реакция замещения вида [12]



где $\Delta G = -4.618$ кДж/моль — тепловой эффект реакции. Оценив значение энергии, необходимой для присоединения одного атома Pb к преципитату, получим $E(i) = \text{const} = 7.67 \cdot 10^{-21}$ Дж.

Зная энергию присоединения свободного атома к преципитату и коэффициент диффузии, мы можем определить знак неравенства (5), считая, что в образцах идет образование сферических преципитатов и тогда $\alpha = 1/3$ и $\beta = 2/3$. Значение b взяли равным периоду решетки $r_0(\text{PbS}) = 0.593$ нм. Анализ неравенства (5) показал, что оно выполняется уже при $(i+m) > 8$, что практически всегда будет верно, так как в данной работе рассматривалось гетерогенное зарождение на границах кристаллитов CdS. Здесь m — некоторое начальное число частиц размером b в зародыше, а так как линейные границы кристаллитов велики по сравнению с b , то можно считать $m \gg 10$. Таким образом, для расчетов вполне справедливо использование

$$k = 4\pi D b. \quad (7)$$

Уравнение роста преципитатов в том случае, когда число частиц, участвующих в преципитации, на порядок меньше общего числа и можно пренебречь влиянием преципитации на процесс диффузии, имеет вид [11]

$$\frac{dN(t)}{dt} = -kN_C^{1-\alpha} [N(t) - N_E] [N_0(x, t) + mN_C - N(t)]^\alpha, \quad (8)$$

где N — концентрация свободных атомов, N_C — концентрация центров зарождения, $N(0)$ — начальная концентрация свободных атомов.

Зная $N(t)$, можно определить среднее число частиц в преципитате $\langle i \rangle$ и его средние размеры (в данном случае радиус преципитата R) из формул

$$\langle i(t) \rangle = \frac{N(0) - N(t)}{N_C}, \quad (9)$$

$$R(t) = \left(\frac{3V_0 \langle i(t) \rangle}{4\pi} \right)^{1/3}, \quad (10)$$

где V_0 — объем молекулы преципитата.

Во время отжига в образцах, полученных с применением технологии ЛБ, происходит процесс диффузии и параллельно с ним идет процесс образования преципитатов, который, в свою очередь, лимитируется диффузией.

Параллельным решением уравнений (2) и (8) методом Рунге–Кутты 4-го порядка с шагом $\tau = 1$ и с учетом формулы (9) было определено среднее число частиц в преципитате на любой глубине. Считая, что преципитат имеет сферическую форму, используя формулу (10), мы рассчитали радиусы преципитатов. Результаты расчетов

Зависимости среднего числа частиц в преципитате $\langle i \rangle$ и радиуса R от глубины залегания преципитата

Глубина, мкм	$\langle i \rangle, 10^4$ шт	$R, \text{Å}$
0.02	12.85	116.98
0.03	8.52	102
0.08	3.36	74.81
0.10	1.99	62.86
0.15	0.62	42.52
0.16	0.33	34.6
0.21	0	0

представлены в таблице. На основании полученных данных были построены зависимости среднего числа частиц в преципитате и его радиуса от глубины залегания. Результаты представлены на рис. 3 и 4.

5. Обсуждение результатов

5.1. Образцы, созданные с применением технологии Ленгмюра—Блоджетт

Из представленных на рис. 3 и 4 зависимостей видно, что преципитаты образовывались только вблизи поверхности образцов, так как диффузия свинца происходила именно оттуда. Начиная с глубины ~ 0.2 мкм преципитаты отсутствуют, так как концентрация образовавшегося сульфида свинца там меньше его предела растворимости в CdS. Размеры преципитатов PbS достигали десятка нанометров, что существенно меньше размеров кристаллитов сульфида кадмия (средний размер кристаллита CdS, определенный методом атомно-силовой микроскопии, лежит в диапазоне 200–300 нм). Отсюда можно сделать вывод, что процессом коалесценции преципитатов можно пренебречь для данного конкретного случая. При совмещении экспериментально полученных данных по ВИФЭ для выхода вторичных ионов свинца из гетерофазной мишени CdS–PbS и результатов расчета размеров преципитатов для образцов, полученных с применением технологии ЛБ, была получена зависимость, представленная на рис. 5.

Из представленных на рис. 5 данных видно, что аномальная реакция на освещение наблюдалась только в тех областях, где существуют достаточно крупные преципитаты PbS. Чем больше средний размер преципитатов, тем значительнее величина эффекта. При этом зависимость нелинейная и имеет некоторое насыщение. Можно предположить существование максимума на этой зависимости и уменьшение эффекта при дальнейшем росте радиуса включений. Это можно объяснить тем, что начиная с некоторого размера преципитата дополнительная энергия, подводимая неравновесными электронами, перераспределяясь в большом объеме преципитата, будет мало влиять на выход вторичных ионов, а эффект туннелирования останется на прежнем уровне

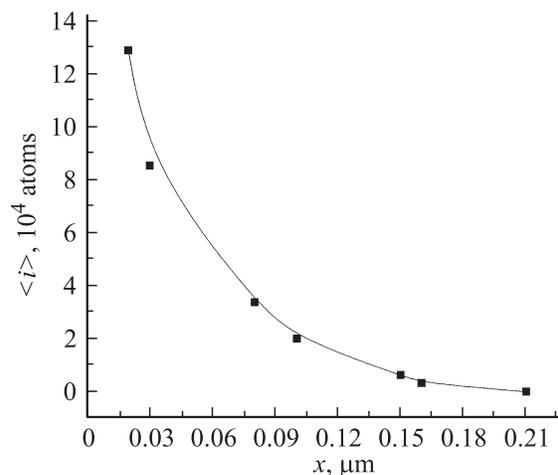


Рис. 3. Зависимость среднего числа частиц в преципитате от глубины его залегания.

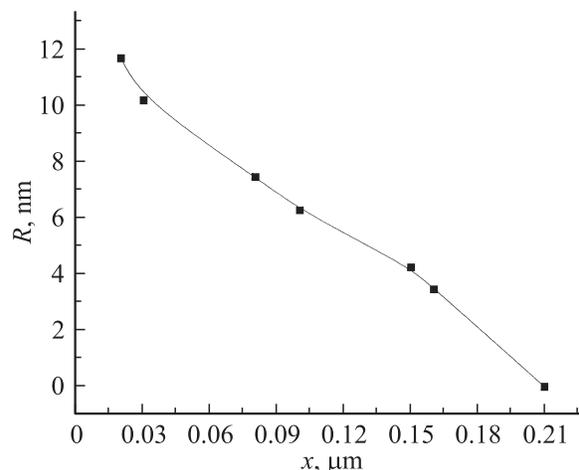


Рис. 4. Зависимость среднего радиуса преципитата на данной глубине от глубины его залегания.

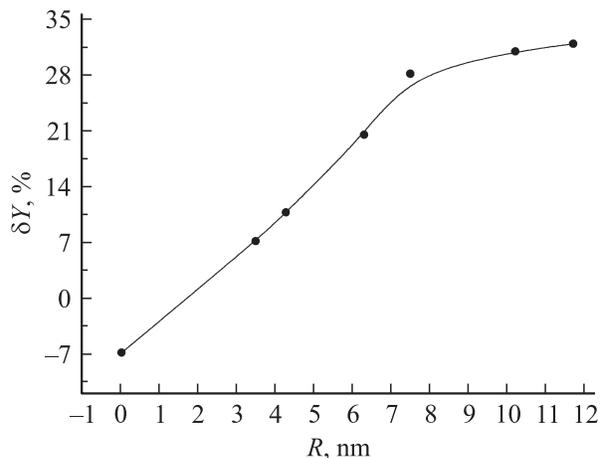


Рис. 5. Зависимость относительного изменения выхода вторичных ионов свинца из гетерофазной мишени CdS–PbS от радиуса преципитата.

и будет сильнее влиять на выход вторичных положительных ионов, снижая его.

5.2. Образцы, созданные термическим испарением

Из представленных на рис. 2 данных видно, что для образцов, созданных термическим испарением, характерны менее резкие зависимости реакции на свет выхода вторичных электронов свинца от глубины. Это связано с тем, что свинец присутствовал по всей глубине пленки, распад пересыщенного раствора происходил также по всей глубине и преципитаты образовывались везде, а не только у поверхности. В этом случае тип ВИФЭ, зависящий от размеров преципитатов, в основном определяется не глубиной распыления, а временем термического отжига. Поскольку технология получения радиационно-стойких поликристаллических образцов CdS–PbS [7] методом термического испарения предусматривает отжиг в течение 10–15 мин при температуре 550°C, интерес для анализа представляют образцы, отожженные в диапазоне времен 5–20 мин при фиксированной температуре.

Как следует из рис. 2, с увеличением времени отжига в указанном диапазоне времен происходит переход от нормального ВИФЭ к аномальному, а затем опять к нормальному, что объясняется ростом размеров узкозонных включений, ответственных за аномальный ВИФЭ. Так, для образцов, отожженных в течение 5 мин, характерен малый разброс по величине ВИФЭ и его нормальный тип. Можно предположить, что за малое время отжига не успевают образовываться преципитаты и механизм ВИФЭ, связанный с аккумуляцией энергии неравновесных носителей заряда узкозонными включениями, отсутствует. Для образцов после 10 мин отжига характерны большой разброс по величине ВИФЭ и смена его типа: если у поверхности ВИФЭ нормальный, то с глубиной он становится аномальным и более интенсивным. Это свидетельствует о достижении преципитатами в результате проведенного отжига достаточных размеров ($R > 2$ нм), оптимальных для эффективного геттерирования неравновесных носителей заряда. Из рис. 1 следует, что у поверхности концентрация сульфида свинца выше, чем в глубине пленки, что способствовало образованию у поверхности преципитатов больших размеров. Поскольку у поверхности этих образцов наблюдался нормальный ВИФЭ, можно предположить, что преципитаты стали настолько крупными, что существенным становился только процесс туннелирования. Дополнительная энергия, приносимая неравновесными носителями заряда в узкозонные включения при освещении и ионной бомбардировке, слабо влияет на выход вторичных ионов, составляющих преципитаты. Для образцов после 20 мин отжига характерен малый разброс по величине ВИФЭ и его нормальный тип по всей толщине пленки. Можно предположить, что за это время успели образоваться достаточно крупные преципитаты по всей толщине пленки. В этих условиях также становится существенным только

процесс туннелирования электронов на вылетающие положительные ионы, что приводит к нормальному ВИФЭ.

6. Заключение

Методом ВИМС были исследованы фоточувствительные пленки CdS–PbS, полученные как с помощью известной технологии совместного термического испарения сульфидов свинца и кадмия, так и с применением технологии ЛБ. На всех образцах наблюдался ВИФЭ, но в отличие от предыдущих работ [5,6] наблюдалась смена типа эффекта для обеих разновидностей образцов в течение одного измерения при освещении белым светом постоянной интенсивности. Был проведен расчет диффузии свинца в пленках CdS–PbS, полученных с применением технологии ЛБ, и с помощью экспериментальных данных ВИФЭ определен соответствующий коэффициент диффузии. Полученные экспериментальные данные использовались для моделирования процесса образования преципитатов PbS в матрице CdS с помощью модели распада пересыщенного раствора [11].

В результате расчетов были определены размеры преципитатов, которые составили десятки нанометров. Сделан вывод о существовании нелинейной зависимости ВИФЭ для положительных ионов, преобладающих в преципитате (ионов Pb), от размеров преципитатов. Определен минимальный средний размер преципитатов, при котором наблюдается влияние геттерирующих узкозонных включений PbS на выход положительных вторичных ионов и возможно изменение типа ВИФЭ на аномальный. Сделано предположение о наличии максимума на этой зависимости. Это предположение основывается на экспериментальных данных ВИФЭ для образцов, полученных термическим испарением, для которых тип ВИФЭ в основном определялся не глубиной распыления, а временем отжига, предшествующим ВИМС. С увеличением времени отжига происходит переход от нормального ВИФЭ к аномальному, а затем опять к нормальному эффекту, что объясняется ростом размеров узкозонных включений, ответственных за аномальный ВИФЭ.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 08-08-00764-а).

Список литературы

- [1] Г.Е. Давидюк, В.В. Божко, Л.В. Булатецкая. ФТП, **42** (10), 1263 (2008).
- [2] Н.Б. Брандт. Соросовский образовательный журн., **4**, 65 (1997).
- [3] А.Г. Роках. Письма ЖТФ, **10** (13), 820 (1984).
- [4] В.Э. Бухаров, А.Г. Роках, С.В. Стецюра. ЖТФ, **73** (2), 93 (2003).
- [5] А.А. Сердобинцев, А.Г. Роках, С.В. Стецюра, А.Г. Жуков. ЖТФ, **77** (11), 96 (2007).

- [6] A.G. Rokakh, A.G. Zhukov, S.V. Stetsyura, A.A. Serdobintsev. Nucl. Instr. Meth, **226** (4), 595 (2004).
- [7] А.Г. Роках, А.В. Кумаков, Н.В. Елагина. Патент 845685 РФ, МКИ Н 01 Б 21/30/. Заявлено 07.02.80. Опубл. 01.07.93. Бюл. № 25.
- [8] С.В. Стецюра, Е.Г. Глуховской, А.А. Сердобинцев, И.В. Маляр. Патент RU 2328059 С1, МПК H01L 31/18/. Заявлено 14.12.06. Опубл. 27.06.08. Бюл. № 18.
- [9] Ю.М. Львов, Л.А. Фейгин. Кристаллография, **32** (3), 800 (1987).
- [10] А.А. Барыбин, В.Г. Сидоров. *Физико-технологические основы электроники* (СПб., Лань, 2001).
- [11] С.В. Булярский, В.В. Светухин. *Физические основы управления дефектообразованием в полупроводниках* (Ульяновск, УльяновГУ, 2002).
- [12] B. Liu, C.H. Chew, L.M. Gan, G.Q. Xu. J. Mater. Res., **16** (6), 1644 (2001).

Редактор Л.В. Шаронова

The influence of narrow-gap inclusion parameters on the type and intensity of secondary-ion photoeffect in heterogeneous photosensitive semiconductors

*S.V. Stetsyura, I.V. Malyar, A.A. Serdobintsev,
S.A. Klimova*

Chernyshevsky Saratov State University,
410012 Saratov, Russia

Abstract The parameters of narrow-gap PbS precipitates in heterogeneous polycrystalline CdS–PbS films prepared by Langmuir–Blodgett technology were determined by secondary ion mass-spectrometry and mathematical simulation methods. The correlation between precipitate size and secondary-ion photoeffect intensity was found. The changing of secondary-ion photoeffect type along the sample depth was explained on the base of simulation results and experimental data. The conclusion regarding nonlinear secondary-ion photoeffect intensity dependence on precipitate sizes was drawn. The existence of critical precipitate size, when influence of narrow-gap inclusions on secondary-ion photoeffect type becomes observable, was established.