

# Сравнительные фотоэлектрические характеристики наноструктурированных пленок $Pb_{1-x}Sn_xSe$ , полученных совместным и послойным осаждением $PbSe$ и $SnSe$

© Х.Н. Мухамедзянов<sup>¶</sup>, В.Ф. Марков, Л.Н. Маскаева

Уральский федеральный университет им. первого президента России Б.Н. Ельцина, 620002 Екатеринбург, Россия

(Получена 24 апреля 2013 г. Принята к печати 4 июня 2013 г.)

Проведен сравнительный анализ фотоэлектрических характеристик пленок твердого раствора  $Pb_{0.975}Sn_{0.025}Se$ , полученного совместным гидрохимическим осаждением  $PbSe$  и  $SnSe$ , и твердого раствора  $Pb_{0.902}Sn_{0.098}Se$ , полученного послойным гидрохимическим осаждением индивидуальных селенидов металлов ( $SnSe-PbSe-SnSe-PbSe$ ) с их последующей термической обработкой на воздухе при 523–700 К. Показано, что пленки, синтезированные методом послойного осаждения, по своим фотоэлектрическим характеристикам имеют ряд преимуществ перед пленками, полученными соосаждением.

## 1. Введение

Создание новых высокочувствительных и в то же время доступных материалов для регистрации и преобразования инфракрасного (ИК) излучения является актуальной проблемой в развитии инфракрасной техники, используемой для температурного мониторинга атмосферы, земной поверхности, поиска полезных ископаемых, создания современных систем вооружений и предотвращения чрезвычайных ситуаций. Наиболее информативны для решения этих задач средний и дальний ИК диапазоны (3–14 мкм) [1–3]. Для материалов, используемых в этой области спектра ( $InSb$ ,  $CdHgTe$ ,  $PbSnTe$ ), характерны сложность технологического оборудования для получения тонких пленок и высокая коммерческая стоимость [4–6]. Актуальной задачей является создание альтернативных соединений. К перспективным соединениям следует отнести твердые растворы замещения в системе (селенид свинца–селенид олова) (II) [7,8]. Их уникальность заключается в присущей им инверсии зон проводимости при формировании общей структуры на основе  $PbSe$ , в результате чего наблюдается уменьшение ширины запрещенной зоны твердого раствора с увеличением содержания в нем олова и расширения тем самым диапазона спектральной чувствительности в дальнюю область ИК спектра [9,10]. Широкое применение фотодетекторов на основе этих материалов возможно при условии, что тонкопленочная технология их изготовления будет отличаться высокой воспроизводимостью характеристик и относительно малозатратна. Указанными качествами обладает метод гидрохимического осаждения пленок. Он не требует сложного технологического оборудования и хорошо апробирован для селенида свинца [11–13]. В ранее выполненных работах наноструктурированные пленки твердых растворов  $Pb_{1-x}Sn_xSe$  были получены как путем совместного (метод СО) [14,15], так и послойного гидрохимического осаждения (метод ПО) [16,17] индивидуальных селенидов

свинца и олова (II) с их последующей термообработкой на воздухе. Однако фотоэлектрические и полупроводниковые характеристики пленок  $Pb_{1-x}Sn_xSe$ , полученных тем и другим путем с использованием гидрохимического осаждения, до настоящего времени не сопоставлялись.

Цель данной работы заключается в сравнении фотоэлектрических и полупроводниковых характеристик наноструктурированных пленок твердых растворов  $Pb_{1-x}Sn_xSe$ , полученных методом совместного осаждения селенидов свинца и олова (II) и методом послойного гидрохимического осаждения  $SnSe$  и  $PbSe$  с последующей термообработкой на воздухе.

## 2. Методика эксперимента

В качестве объектов исследования были взяты пленки  $Pb_{0.975}Sn_{0.025}Se$ , синтез которых проводился путем соосаждения  $SnSe$  и  $PbSe$ , и пленки  $Pb_{0.902}Sn_{0.098}Se$ , полученные послойным гидрохимическим осаждением индивидуальных селенидов металлов в последовательности  $SnSe-PbSe-SnSe-PbSe$ . Гидрохимический синтез пленок осуществляли в стеклянных герметичных реакторах из молибденового стекла объемом 100 мл, помещенных в термостат марки „U-10“, точность измерения температуры в котором составляла  $\pm 0.1^\circ$ . В качестве материала подложки использовали ситалл марки СТ-50-1-2.

Реакционная смесь для получения пленок путем совместного осаждения селенидов свинца и олова (II) включала соли этих металлов, цитрат натрия, гидроксид аммония, селенокарбамид и сульфит натрия. При гидрохимическом синтезе четырехслойной композиции  $SnSe-PbSe-SnSe-PbSe$  пленки  $SnSe$  и  $PbSe$  осаждали последовательно в отдельных реакторах. Реакционная смесь для получения пленок  $SnSe$  включала соль олова (II), трилон Б, гидроксид натрия, а также селенокарбамид с сульфитом натрия. Пленки  $PbSe$  получали из ванны, содержащей соль свинца, этилендиамин, селенокарбамид, ацетат аммония и сульфит натрия. Все полученные пленки с целью сенсibilизации к ИК

<sup>¶</sup> E-mail: newage@isnet.ru

излучению подвергали термообработке на воздухе в негерметично закрытой емкости при 573–700 К [18]. Для этого использовалась электрическая печь ПМ-1.0-7 с точностью поддержания температуры  $\pm 2$  К.

Измерение толщин пленок проводили оптическим методом. Спектры отражения снимали на инфракрасном спектрофотометре Specord 75 IR в интервале длин волн 2.5–25.0 мкм.

Фазовый состав и структуру пленок определяли методом рентгеновской дифракции на дифрактометре ДРОН-3 с медным излучением в режиме сканирования с шагом  $0.02^\circ$  и временем накопления сигнала в точке 5 с. Долю селенида олова в структуре твердого раствора  $Pb_{1-x}Sn_xSe$  рассчитывали по правилу Вегарда [19], при этом использовали значение периода решетки псевдокубического SnSe, равное 0.6002 нм [20]. Ошибка определения содержания замещающего компонента в твердом растворе не превышала  $\pm 0.4$  мол% с доверительной вероятностью 90%.

Измерение фотоэлектрических характеристик проводили в соответствии с ГОСТ 17782-79. Для измерения вольт-ваттной чувствительности и темнового сопротивления использовали измерительный стенд К.54.410. Для выполнения электрофизических измерений и исследования полупроводниковых свойств на экспериментальные образцы пленок электрохимическим способом наносили никелевые омические контакты, к которым с использованием низкотемпературного припоя припаявали золотые проводники. Размеры чувствительного элемента исследованных образцов составляли  $2 \times 2$  мм.

Измерение постоянной времени образцов пленок проводили двухчастотным методом с точностью  $\pm 10\%$ .

Низкотемпературные исследования фотоэлектрических характеристик проводили в разработанном вакуумном криостате при помощи двухкаскадного термоэлектрического охладителя (ТЭО) при остаточном давлении  $10^{-1}$  Па в интервале 220–300 К и точностью поддержания температуры  $\pm 0.2$  К. В качестве ТЭО использовался двухкаскадный термоэлектрический охладитель производства ГНПП ТФП „Остерм“ (г. Санкт-Петербург).

Для исследования фотоэлектрических и спектральных характеристик пленок при температуре 80 К использовали азотный криостат. Относительные спектральные характеристики fotocувствительности снимали с использованием двойного монохроматора SPM-2 на частоте модуляции излучения 1000 Гц. В качестве источника излучения использовали галогеновую лампу накаливания КГМ-12-100, режим работы которой был стабилизирован по току с точностью  $\pm 0.2\%$ . Запись спектров осуществляли в автоматическом режиме в диапазоне длин волн 0.4–10.0 мкм с шагом 0.05 мкм.

Определение термической ширины запрещенной зоны проводили по стандартной методике, основанной на температурной зависимости проводимости [21]. Оптическую ширину запрещенной зоны рассчитывали исходя из граничной длины волны спектральной характеристики [22].

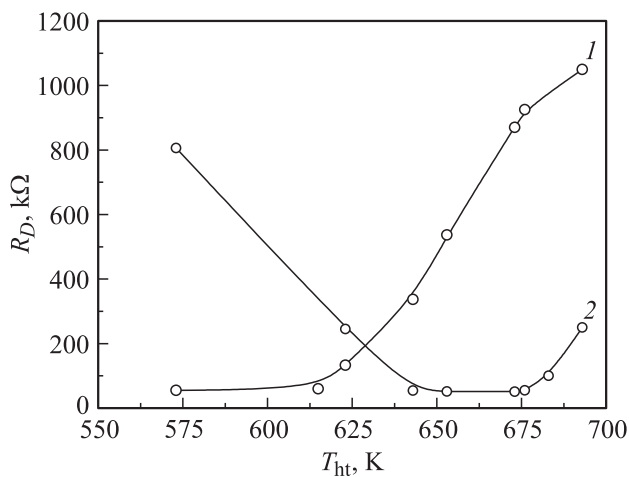
### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

При совместном осаждении (метод СО) селенидов свинца и олова (II) на подложку образование твердого раствора  $Pb_{1-x}Sn_xSe$  возможно непосредственно в процессе синтеза с последующей стабилизацией его состава при термообработке. Формирование структуры твердого раствора  $Pb_{1-x}Sn_xSe$  при послойном осаждении (метод ПО) селенидов PbSe и SnSe происходит предположительно в процессе операции термического отжига.

По результатам ранее выполненных работ [14,15] максимальное содержание SnSe в пленках твердых растворов  $Pb_{1-x}Sn_xSe$ , полученных методом соосаждения PbSe и SnSe, не превышало 9.6 мол%. Послойным гидротермическим осаждением PbSe и SnSe при формировании четырехслойной композиции SnSe–PbSe–SnSe–PbSe с последующей ее термообработкой получены твердые растворы замещения  $Pb_{1-x}Sn_xSe$ , содержащие до 13.2 мол% SnSe [16,17]. Метод послойного осаждения селенидов свинца и олова (II) с формированием многослойных композиций требует проведения большего числа операций синтеза, однако позволяет лучше подобрать оптимальные условия осаждения селенидов металлов в отличие от метода соосаждения, где процесс синтеза связан с протеканием конкурирующих реакций образования PbSe и SnSe в одном реакторе, контроль за которыми затруднителен.

Достижение высоких пороговых фотоэлектрических характеристик пленок  $Pb_{1-x}Sn_xSe$  за счет их термообработки требует определения оптимальной температуры и времени процесса, условий его проведения [18]. Для термообработанных при указанных выше условиях пленках наблюдается корреляция между величиной фотоответа и содержанием по данным рентгеновского анализа кислородсодержащих фаз оксида свинца PbO, селенита свинца  $PbSeO_3$ , а также бинарного соединения  $4PbO \cdot PbSeO_3$ , играющих, вероятно, определяющую роль в реализации процесса фотопроводимости [23].

На рис. 1 приведены зависимости темнового сопротивления пленки  $Pb_{0.975}Sn_{0.025}Se$ , полученной методом СО (кривая 1), и пленки  $Pb_{0.902}Sn_{0.098}Se$ , представляющей собой результат синтеза четырехслойной композиции (кривая 2), от температуры термоактивации в диапазоне 523–700 К в течение 60 мин. Из рисунка видно, что если с повышением температуры термообработки сопротивление пленки, полученной методом СО, имело монотонную тенденцию к увеличению, повысившись с 55 кОм при 573 К до 870 кОм при 673 К, то для пленки, синтезированной по технологии ПО, в результате нагрева оно, наоборот, уменьшалось, снизившись с 806 кОм при 573 К до 52 кОм при 653–673 К. Дальнейшее увеличение температуры процесса до 693 К сопровождалось увеличением сопротивления до 250 К. Основной причиной принципиально различающихся зависимостей является, вероятно, толщина пленок (соответственно 1.8



**Рис. 1.** Зависимости темного сопротивления  $R_D$  пленок  $Pb_{0.975}Sn_{0.025}Se$  (1) (метод СО) и  $Pb_{0.902}Sn_{0.098}Se$  (2) (метод ПО) от температуры обработки  $T_{ht}$  на воздухе в течение 60 мин.

и 0.7 мкм), определяющая интенсивность и глубину их окисления.

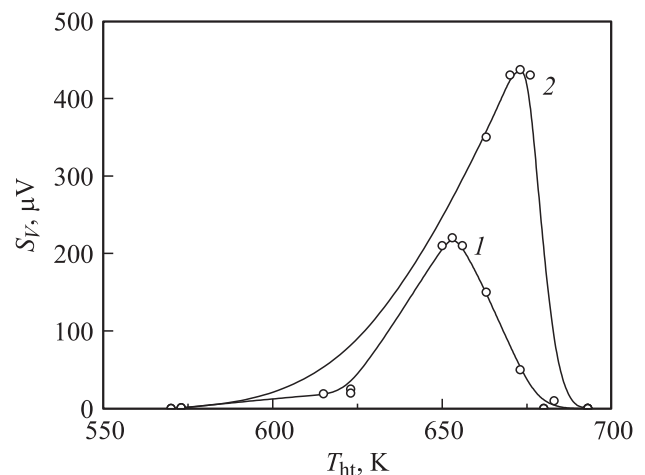
Сравниваемые пленки отличаются также и величиной вольтовой чувствительности. Как следует из рис. 2, вольтовая чувствительность  $S_V$  четырехслойной композиции  $Pb_{0.902}Sn_{0.098}Se$  примерно вдвое превышает такую у пленки, полученной соосаждением. Это, вероятно, связано с различной степенью окисления материала пленки и, следовательно, с изменением содержания кислородсодержащих фаз, определяющих величину фототовета [24,25]. В том и другом случае характер кривых экстремальный.

С увеличением температуры отжига наблюдается рост вольтовой чувствительности, который затем сменяется резким ее снижением за счет переокисления материала. Положение максимума вольтовой чувствительности пленки  $Pb_{0.975}Sn_{0.025}Se$  соответствует 653 К, а у более толстой четырехслойной композиции  $Pb_{0.902}Sn_{0.098}Se$  — 673 К. Из полученных зависимостей видно, что для каждой пленки существует оптимальная температура обработки, обеспечивающая максимальный уровень ее вольтовой чувствительности. Это связано прежде всего с достижением при температуре экстремума оптимального для конкретной пленки содержания и состава образовавшихся в ней кислородсодержащих фаз [24,25]. Характер приведенных на рис. 2 зависимостей является типичным для всех исследованных в работе пленок.

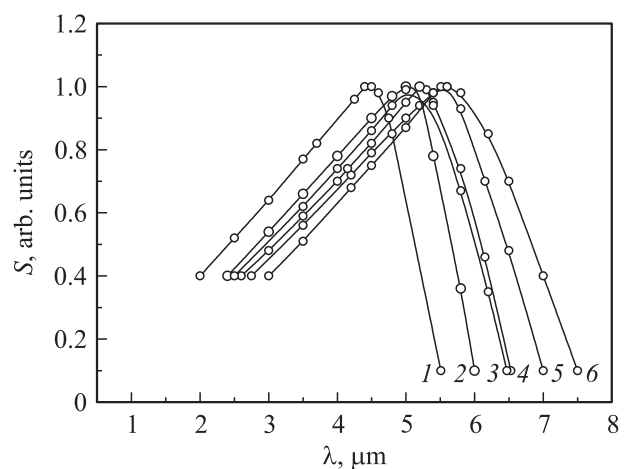
На рис. 3 изображены относительные спектральные характеристики fotocувствительности обсуждаемых пленок при 300, 220 и 80 К. Температура обработки для пленок, полученных соосаждением и послойным осаждением, соответственно составила 653 и 673 К. Как видно из рисунка, длинноволновая граница поглощения у четырехслойной композиции ( $Pb_{0.902}Sn_{0.098}Se$ ), полученной методом ПО, находится „правее“ примерно на 1.0 мкм во всем рассматриваемом интервале температур по сравнению с пленкой  $Pb_{0.975}Sn_{0.025}Se$ , полученной

методом СО. Так, при 300, 220 и 80 К для  $Pb_{0.902}Sn_{0.098}Se$  длинноволновая граница составляет 5.5, 6.0 и 6.5 мкм, а для  $Pb_{0.975}Sn_{0.025}Se$  соответственно 6.5, 7.0 и 7.5 мкм. Видно, что для пленки с более высоким содержанием олова в составе твердого раствора сдвиг кривой спектральной чувствительности в длинноволновую область спектра выражен сильнее.

Путем построения зависимостей логарифма темнового сопротивления  $\ln R_D$  исследуемых пленок  $Pb_{1-x}Sn_xSe$  от обратной температуры ( $\ln R_D - 1/T$ ) была определена их термическая ширина запрещенной зоны. На рис. 4 приведены зависимости  $\ln R_D$ , а также значения оптической и термической ширины запрещенных зон исследуемых пленок от обратной температуры. Из рисунка видно, что пленка твердого раствора  $Pb_{0.975}Sn_{0.025}Se$  (метод СО) при температуре 300 К имеет термиче-



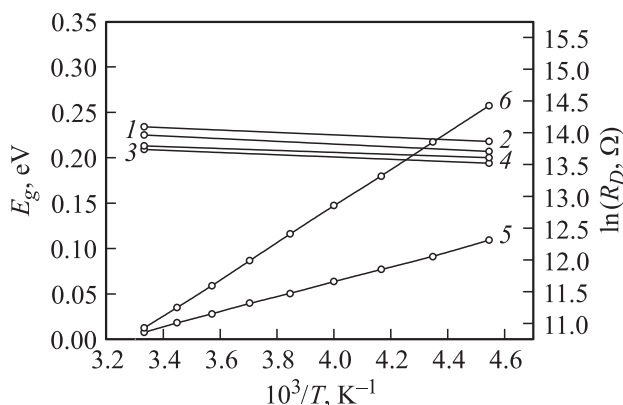
**Рис. 2.** Зависимости вольтовой чувствительности  $S_V$  пленок  $Pb_{0.975}Sn_{0.025}Se$  (метод СО) (1) и четырехслойной композиции  $Pb_{0.902}Sn_{0.098}Se$  (метод ПО) (2) от температуры термообработки  $T_{ht}$ .



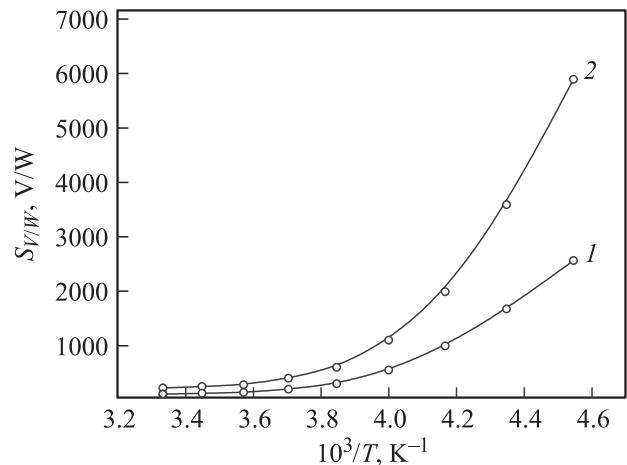
**Рис. 3.** Относительные спектральные характеристики fotocувствительности пленок  $Pb_{0.975}Sn_{0.025}Se$  (метод СО) — 1, 2, 3 и  $Pb_{0.902}Sn_{0.098}Se$  (метод ПО) — 4, 5, 6 при 300 (1, 4), 220 (2, 5), 80 К (3, 6).

скую ширину запрещенной зоны, равную 0.213 эВ, которая при снижении температуры до 220 К уменьшается до 0.2 эВ (кривая 4). Оптическая ширина запрещенной зоны этого же твердого раствора при температуре 300 К составляет 0.234 эВ и уменьшается до 0.218 эВ при понижении температуры до 220 К (кривая 2). В результате в интервале температур 220–300 К оптическая ширина запрещенной зоны превышает термическую ширину запрещенной зоны на 0.018–0.021 эВ соответственно. В свою очередь пленка твердого раствора  $\text{Pb}_{0.902}\text{Sn}_{0.098}\text{Se}$  (метод ПО) при 300 К имеет термическую ширину запрещенной зоны, равную 0.209 эВ, а при 220 К — 0.194 эВ (кривая 3). Оптическая ширина запрещенной зоны этого твердого раствора при температуре 300 К составляет 0.225 эВ и уменьшается до 0.207 эВ при понижении температуры до 220 К (кривая 1). Таким образом, и для этой пленки в интервале 220–300 К оптическая ширина запрещенной зоны выше термической. Можно предположить, что это связано с захватом фотонов дефектами структуры поверхности пленок с образованием электронно-дырочных пар, а также с увеличением энергии активации процесса фотопроводимости на величину, обеспечивающую преодоление поверхностного барьера, образовавшегося за счет оксидных фаз [26,27].

Полученные обоими методами пленки  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}$  после термического окисления являются сильно легированными полупроводниками *p*-типа [15,17]. Это можно объяснить наличием высоких концентраций электрически активных примесей, образующих акцепторные примесные уровни, которые формируют в материале значительную по величине примесную зону. В создании акцепторных примесных уровней внутри запрещенной зоны участвуют вакансии и несовершенства структуры, а также образуемые при термическом окислении оксиды, селениты и оксиселениты свинца ( $\text{PbO}_x$ ,  $\text{SeO}_2$ ,  $\text{PbSeO}_3$ ,  $2\text{PbO} \cdot \text{PbSeO}_3$ ,  $4\text{PbO} \cdot \text{PbSeO}_3$ ,  $\text{PbSeO}_4$ ,  $\text{PbO} \cdot \text{PbSeO}_4$ ,  $4\text{PbO} \cdot \text{PbSeO}_4$ ,  $2\text{PbO} \cdot \text{PbSeO}_4$ ), которые



**Рис. 4.** Зависимости оптической (1, 2), термической (3, 4) ширины запрещенной зоны и логарифма темнового сопротивления  $\ln R_D$  (5, 6) от обратной температуры для пленки  $\text{Pb}_{0.902}\text{Sn}_{0.098}\text{Se}$  (метод ПО) — 1, 3, 5 и пленки  $\text{Pb}_{0.975}\text{Sn}_{0.025}\text{Se}$  (метод СО) — 2, 4, 6. Температура отжига — 653 К (метод СО) и 673 К (метод ПО).



**Рис. 5.** Зависимости вольт-ваттной чувствительности  $S_{V/W}$  пленок твердых растворов  $\text{Pb}_{0.975}\text{Sn}_{0.025}\text{Se}$  (метод СО) — 1 и  $\text{Pb}_{0.902}\text{Sn}_{0.098}\text{Se}$  (метод ПО) — 2 от температуры. Температура термоактивации — 653 К (метод СО) и 673 К (метод ПО).

являются ловушками для неосновных носителей (электронов) [27–30].

Полупроводник на основе твердого раствора  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}$  является невырожденным, так как в противном случае наблюдались бы заметные эффекты фотоэдс и выпрямления. Зависимость логарифма сопротивления от температуры (рис. 4, кривые 5, 6) для всех исследованных пленок практически линейна, что характерно для несобственного поликристаллического полупроводника с межкристаллитными потенциальными барьерами.

Температурный коэффициент термической ширины запрещенной зоны в интервале 220–300 К для пленки твердого раствора  $\text{Pb}_{0.975}\text{Sn}_{0.025}\text{Se}$  (метод СО) по расчету составил  $\Delta E_g^{\text{therm}}/\Delta T = 2.0 \cdot 10^{-4}$  эВ/К, а для  $\text{Pb}_{0.902}\text{Sn}_{0.098}\text{Se}$  (метод ПО) —  $2.25 \cdot 10^{-4}$  эВ/К.

На рис. 5 приведены зависимости вольт-ваттной чувствительности от температуры для пленок  $\text{Pb}_{0.975}\text{Sn}_{0.025}\text{Se}$  (метод СО) и  $\text{Pb}_{0.902}\text{Sn}_{0.098}\text{Se}$  (метод ПО), термически обработанных при 653 и 673 К соответственно. Видно, что пленка  $\text{Pb}_{0.902}\text{Sn}_{0.098}\text{Se}$  имеет более высокую вольт-ваттную чувствительность в диапазоне 220–300 К по сравнению с  $\text{Pb}_{0.975}\text{Sn}_{0.025}\text{Se}$ . В указанном температурном интервале вольт-ваттная чувствительность  $\text{Pb}_{0.902}\text{Sn}_{0.098}\text{Se}$  (метод ПО) возросла с 190 до 5890 В/Вт, в то время как для пленки  $\text{Pb}_{0.975}\text{Sn}_{0.025}\text{Se}$  (метод СО) соответствующие изменения находятся в пределах 95–2560 В/Вт. Отметим, что изменение постоянной времени при этом для пленки  $\text{Pb}_{0.975}\text{Sn}_{0.025}\text{Se}$  (метод СО) составило от 3 до 18 мкс, а для  $\text{Pb}_{0.902}\text{Sn}_{0.098}\text{Se}$  (метод ПО) этот параметр возрос с 2 до 15 мкс.

## 4. Заключение

Сравнение методов соосаждения селенидов свинца и олова и их послыоного осаждения в виде тонкопле-

ночных композиций с целью формирования твердых растворов  $Pb_{1-x}Sn_xSe$  показало ряд различий в их фотоэлектрических и спектральных характеристиках.

Пленки твердых растворов  $Pb_{1-x}Sn_xSe$ , полученные методом соосаждения, требуют более низкой рабочей температуры термоактивации, однако они обладают меньшей величиной фотоотклика.

Максимально достигнутые значения вольт-ваттной чувствительности пленки твердого раствора, полученной послойным осаждением  $Pb_{0.902}Sn_{0.098}Se$ , в 2–3 раза превышают аналогичный параметр для  $Pb_{0.975}Sn_{0.025}Se$ .

Установлено, что максимум кривой относительной спектральной чувствительности и ее „правый край“ для пленки  $Pb_{0.902}Sn_{0.098}Se$ , сформированной послойным осаждением, имеют больший сдвиг в длинноволновую область ИК спектра по сравнению с исследованной соосажденной пленкой.

Определенные по результатам низкотемпературных исследований в интервале 300–220 К температурные коэффициенты ширины запрещенной зоны пленок твердых растворов  $Pb_{0.975}Sn_{0.025}Se$  (метод СО) и  $Pb_{0.902}Sn_{0.098}Se$  (метод ПО) составили соответственно  $2.0 \cdot 10^{-4}$  и  $2.25 \cdot 10^{-4}$  эВ/К.

## Список литературы

- [1] Ж. Госсорг. *Инфракрасная термография. Основы, техника, применение* (М., Мир, 1988).
- [2] Б.Н. Формозов. *Аэрокосмические фотоприемные устройства видимого и инфракрасного диапазона* (СПб., ГУАП, 2002).
- [3] Л.Н. Курбатов. Прикл. физика, **3**, 5 (1999).
- [4] С.Р. Li, P.J. Mc Cann, X.M. Fang. J. Cryst. Growth, **208**, 423 (2000).
- [5] J. John, A. Fach, J. Masck, P. Muller, C. Paglino, H. Zogg. Appl. Surf. Sci., **102**, 346 (1996).
- [6] X.J. Wang, C. Fulk, F. Zhao, D. Li, S. Mukherjee, Y. Chang, R. Sporcken, R. Klic, Z. Shi, C.H. Grein, S. Sivananthan. J. Electron Mater., **37** (9), 1200 (2008).
- [7] Б.А. Волков, О.А. Панкратов, А.В. Сазонов. ФТТ, **26** (2), 430 (1984).
- [8] Н.П. Гавалешко, П.Н. Горлей, В.А. Шендеровский. *Узкозонные полупроводники. Получение и физические свойства* (Киев, Наук. думка, 1984).
- [9] Н.Х. Абрикосов, Л.Е. Шелимова. *Полупроводниковые материалы на основе соединений  $A^{IV}B^{VI}$*  (М., Наука, 1975).
- [10] A. Szczerbakow, H. Berger. J. Cryst. Growth, **139** (1, 2), 172 (1994).
- [11] Х.Н. Мухамедзянов, М.П. Миронов, С.И. Ягодин, Л.Н. Маскаева, В.Ф. Марков. Цветные металлы, **12**, 57 (2009).
- [12] Н.А. Третьякова, В.Ф. Марков, Л.Н. Маскаева, Х.Н. Мухамедзянов. Конденсированные среды и межфазные границы, **7** (2), 189 (2005).
- [13] Н.А. Третьякова, В.Ф. Марков, Л.Н. Маскаева, Х.Н. Мухамедзянов. Химия и химическая технология. Сб. тр. УГТУ–УПИ, **97** (2006).
- [14] В.Ф. Марков, Н.А. Третьякова, Л.Н. Маскаева, Х.Н. Мухамедзянов. Вестн. УГТУ–УПИ. Сер. хим., **5** (57), 75 (2005).
- [15] Л.Н. Маскаева, В.Ф. Марков, В.М. Баканов, Х.Н. Мухамедзянов. ФТТ, **54** (4), 679 (2012).
- [16] М.П. Миронов, А.Ю. Кирсанов, В.Ф. Дьяков, Л.Н. Маскаева, В.Ф. Марков. Бутлеровские сообщ., **19** (3), 45 (2010).
- [17] В.Ф. Марков, Х.Н. Мухамедзянов, Л.Н. Маскаева, З.И. Смирнова. ФТП, **45** (11), 1459 (2011).
- [18] М.П. Миронов, В.Ф. Марков, Л.Н. Маскаева, В.Ф. Дьяков, Р.Д. Мухамедьяров, Х.Н. Мухамедзянов, З.И. Смирнова. Патент РФ № 2357321, МПК Н 01 L 21/36. Оpubл. 27.05.2009. Бюл. № 15. 4 с.
- [19] L. Vegard. Z. Phys., **5**, 17 (1921).
- [20] ASTM X-ray diffraction date cards, Philadelphia, 14-159 (1968).
- [21] Ю.Р. Равич, Б.А. Ефимова, И.А. Смирнов. *Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам свинца PbTe, PbSe, PbS* (М., Наука, 1968).
- [22] Л.А. Сена. *Единицы физических величин и их размерности* (М., Наука, 1988).
- [23] В.М. Баканов, З.И. Смирнова, Х.Н. Мухамедзянов, Л.Н. Маскаева, В.Ф. Марков. Конденсированные среды и межфазные границы, **13** (4), 401 (2011).
- [24] Е.М. Гамарц, Н.В. Голубченко, В.А. Мошников, Д.Б. Чеснокова. Матер. электрон. техн., **4**, 25 (2003).
- [25] Н.В. Голубченко, М.А. Иошт, В.А. Мошников, Д.Б. Чеснокова. Перспективные материалы, **3**, 31 (2005).
- [26] J.N. Humphrey, R.L. Petritz. Phys. Rev., **105** (6), 1736 (1957).
- [27] Д.В. Казанцев, Ю.Г. Селиванов, В.Т. Трофимов и др. Письма ЖЭТФ, **62** (5), 422 (1995).
- [28] J.N. Humphrey, W.W. Scanlon. Phys. Rev., **105** (2), 469 (1957).
- [29] R.L. Petritz. Phys. Rev., **104** (6), 1508 (1956).
- [30] J.N. Humphrey, R.L. Petritz. Phys. Rev., **105** (4), 1192 (1957).

Редактор Т.А. Полянская

## Comparative photovoltaic characteristics of nanostructured $Pb_{1-x}Sn_xSe$ films obtained by co-deposition and by layer-by-layer deposition of PbSe and SnSe

H.N. Mukhamedzyanov, L.N. Maskaeva, V.F. Markov

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin  
620008 Ekaterinburg, Russia

**Abstract** The comparative analysis of photovoltaic characteristics of the films of the  $Pb_{0.975}Sn_{0.025}Se$  solid solution obtained by hydrochemical co-deposition of PbSe and SnSe, and  $Pb_{0.902}Sn_{0.098}Se$  solid solution obtained by layer-by-layer hydrochemical deposition of individual metal selenides (SnSe-PbSe-SnSe-PbSe) with the subsequent thermal treatment of the films on air at 523–700 K has been carried out. It has shown that the films, synthesized by the method of layer-by-layer deposition, according to their photovoltaic characteristics have a number of advantages before the films obtained by hydrochemical co-deposition.