

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДИК ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР

В настоящее время продолжают активные материаловедческие исследования, в рамках которых реализуются современными тенденциями развития пленочных структур такие, как переход от микро- к наноструктурированным пленкам индивидуальных соединений и твердых растворов, замена функционального контакта в виде р-п-перехода или контакта Шоттки на гетеропереход, что позволяет существенно повысить эффективность микро-, нано- и оптоэлектронных приборов благодаря эффектам сверхинжекции, широкозонного окна, квантового ограничения и другим.

Активно продолжают разработки гетероструктурных материалов на основе поглощающих сульфидных слоев. В частности, подчеркивается перспективность использования недорогих бинарных сульфидов металлов, включая Sb_2S_3 , SnS , PbS , Cu_2S , Ag_2S , Bi_2S_3 и FeS_2 [1], в качестве светопоглощающих материалов в тонкопленочных солнечных элементах.

Анализ актуальных литературных данных показывает, что в гетероструктурах для солнечных элементов на основе поглощающего слоя SnS в качестве слоя, выполняющего функцию широкозонного окна, по-прежнему активно изучаются такие широкозонные полупроводники, как халькогениды CdS , ZnS , $Cd_xZn_{1-x}S$, а также оксиды ZnO , TiO_2 , SnO_2 и другие материалы. Касаясь динамики прогресса в улучшении выходных параметров фотовольтаических структур, можно заметить, что в обзоре интернационального коллектива авторов 2010 года [2] в качестве лидера указывалась гетероструктура CdS/SnS , для которой при использовании метода вакуумного напыления были достигнуты следующие фотовольтаические параметры: напряжение разомкнутой цепи $V_{oc} = 0,500$ В, плотность тока короткого замыкания $J_{sc} = 10,0$ мА/см², коэффициент заполнения световой ВАХ $FF = 50$ % и конверсионная эффективность – 2,5 %. К настоящему времени одним из самых высоких показателей эффективности среди солнечных элементов на основе SnS является КПД преобразования на уровне 5 %, достигнутый авторами [3, 4] при использовании гетероструктуры SnS/TiO_2 .

Таким образом, актуальным направлением развития SNS-оптоэлектроники является более активное исследование гетероструктур, в которых в качестве широкозонного полупроводника используются оксидные, а не сульфидные полупроводники, в частности ZnO, TiO₂, SnO₂, CuO, NiO и другие полупроводниковые оксиды. Насущной задачей является исследование комбинированных аппаратно несложных методик формирования гетероструктур, позволяющих, с одной стороны, обеспечить снижение продолжительности формирования поглощающего слоя SnS повышенной толщины и, с другой стороны обеспечить управляемое нанесение наноразмерного контактного слоя широкозонного полупроводника.

Объектами исследований в данной работе выступали фоточувствительные гетероструктуры ZnO/SnS_x на основе светопоглощающих пленок сульфидов олова (II). Моносульфид олова SnS относится к классу полупроводников A^{IV}B^{VI} и характеризуется слоистой кристаллической структурой, атомные слои которой связаны только силами Ван-дер-Ваальса. Это позволяет использовать SnS для создания гетеропереходов с высокой степенью гетерогенности без промежуточных электронных уровней на поверхности контакта слоев.

При формировании гетероструктур на основе поглощающего слоя SnS_x и широкозонного окна ZnO целью являлось получение поглощающего сульфидного слоя повышенной толщины и прозрачного оксидного слоя пониженной толщины. При формировании гетероструктур были изучены варианты варьирования последовательности нанесения слоев методом ионного наслаивания, то есть были сформированы гетероструктуры ZnO/SnS_x/ITO и SnS_x/ZnO/ITO. Кроме того, была разработана и изучена методика комплексного жидкофазного осаждения гетероструктуры ZnO/SnS_x/ITO в цикле «электроосаждение SnS_x – ионное наслаивание ZnO».

Данные по структурно-химическим характеристикам пленок SnS_x, электроосажденных в импульсном режиме на электропроводящих подложках (Cu или ITO), полученные с помощью растровой электронной микроскопии и энергодисперсионного микроанализа показали, что образование стехиометричных пленок SnS_{1±δ} при δ ≤ 10% наблюдается при использовании подложек ITO/стекло с толщиной электропроводящего слоя ITO не менее 100 нм и поверхностным электросопротивлением не более 50 Ом/□.

Исследования с помощью методов спектрофотометрии, вольт-амперометрии по влиянию режимов электроосаждения слоя SnS_x и ионного наслаивания слоя ZnO на их оптические и электронотранспортные свойства показали, что использование метода электроосаждения для формирования светопоглощающего базового слоя SnS_x позволяет обеспечить получение покрытий с высоким коэффициентом

оптического поглощения на уровне $5-9 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$ и стабильным омическим состоянием в диапазоне рабочих температур 20–150 °С.

Таблица 1 – Результаты исследования фоторезистивных свойств гетероструктуры 20ZnO/120SnS_x/ITO

Мощность излучения, Вт	Поверхностное электропротивление, кОм/□		
	SnS _x /ITO	SnS _x -SnS _x	SnS _x /ZnO
0	1123,4	784,5	8602,4
1	1078,5	688,3	7553,3
2	1024,4	640,8	7437,6
3	988,5	629,5	7341,0
4	925,1	568,1	7138,3
5	868,3	543,0	6932,2
6	828,3	531,4	6682,3
7	801,9	495,4	6320,4
8	774,6	488,2	5407,1
9	754,5	478,7	4895,5
10	741,9	450,2	3954,4

Разработка методики формирования фоточувствительных планарных субмикронных гетероструктур ZnO/SnS_x с использованием комбинированного цикла «электроосаждение SnS_x - ионное наслаивание ZnO» и сформированы планарные субмикронные гетероструктуры ZnO/SnS_x, которые проявляют перспективные фоточувствительные свойства, в частности, обеспечивают по сравнению с индивидуальными пленками SnS_x повышение генерируемой величины фотоэдс до 0,2 В или в 2,8 раза, а также повышение фоторезистивной чувствительности до значений 560 Ом/Вт или в 4 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. A review on binary metal sulfide heterojunction solar cells // D. G. Moon, S. Rehan, D.H. Yeon et al. // Solar Energy Mater. Solar Cells. – 2019. – Vol. 200. – Ar. 109963. – 23 p.
2. Thin films of tin sulfide for application in photovoltaic solar cells / K.T. Ramakrishna Reddy, P. Prathap, R.W. Miles // Photovoltaics: developments, applications and Impact. Energy Science, Engineering and Technology. –New York: Nova Science Publishers, 2010. – P. 37–62.
3. Efficient nanostructured TiO₂/SnS heterojunction solar ceels / H.S. Yun, B. Park, J. Im [et al.] // Adv. Energy Mater. – 2019. – Vol. 9, No.35. – P. 99–105.
4. Photovoltaic behavior of SnS solar cells under temperature variations / Cheraghizade M. [et al.] // Optik. – 2022. – Ar. 168635. – 9 p.