

07

Создание и электрические свойства гетеропереходов $p\text{-Cu}_2\text{ZnSnS}_4/n\text{-Si}$

© А. Юсупов¹, К. Адамбаев¹, З.З. Тураев², С.Р. Алиев³,
А. Кутлимратов⁴

¹Ташкентский автомобильно-дорожный институт, Узбекистан

²Национальный университет Узбекистана им. М. Улугбека, Ташкент

³Андижанский государственный университет, Узбекистан

⁴Физико-технический институт АН РУз, Ташкент, Узбекистан

E-mail: ayus@mail.ru

Поступило в Редакцию 23 сентября 2016 г.

Впервые получены анизотипные гетеропереходы $p\text{-Cu}_2\text{ZnSnS}_4/n\text{-Si}$ методом сульфидизации базовых металлических слоев, предварительно напыленных на подложку из поликристаллического кремния. Анализируются вольт-амперные характеристики и обсуждаются механизмы токопрохождения в созданных структурах. Показано, что для прямого смещения характерны туннельно-рекомбинационные процессы и токи, ограниченные пространственным зарядом. При обратных смещениях в гетеропереходе преобладают токи, ограниченные пространственным зарядом.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.02.44193.16474

В последнее время растет интерес к полупроводниковым гетеропереходам благодаря ряду их преимуществ по сравнению с гомопереходами. Гетеропереходы (ГП) широко используются в электронике и фотовольтаике [1,2]. При изготовлении солнечных элементов (СЭ) на основе ГП в качестве поглощающего слоя используются прямозонные полупроводники с большим коэффициентом оптического поглощения.

Полупроводниковое четверное соединение $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) рассматривается как перспективный материал для создания поглощающего слоя СЭ [3,4]. CZTS является прямозонным полупроводником с шириной запрещенной зоны порядка 1.5 eV [1,2] и обладает большим коэффициентом поглощения ($\sim 10^5 \text{ cm}^{-1}$ [3]) [3,4]. Его компонентами являются широко распространенные в природе, дешевые и нетоксичные элементы. На основе соединения $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}(\text{Se})_4$ за последние несколько лет созданы СЭ с эффективностью от 5.4 до 12.6% [5,6]. Поэтому CZTS

считается перспективным материалом для замены индий-галлиевого соединения в тонкопленочных СЭ.

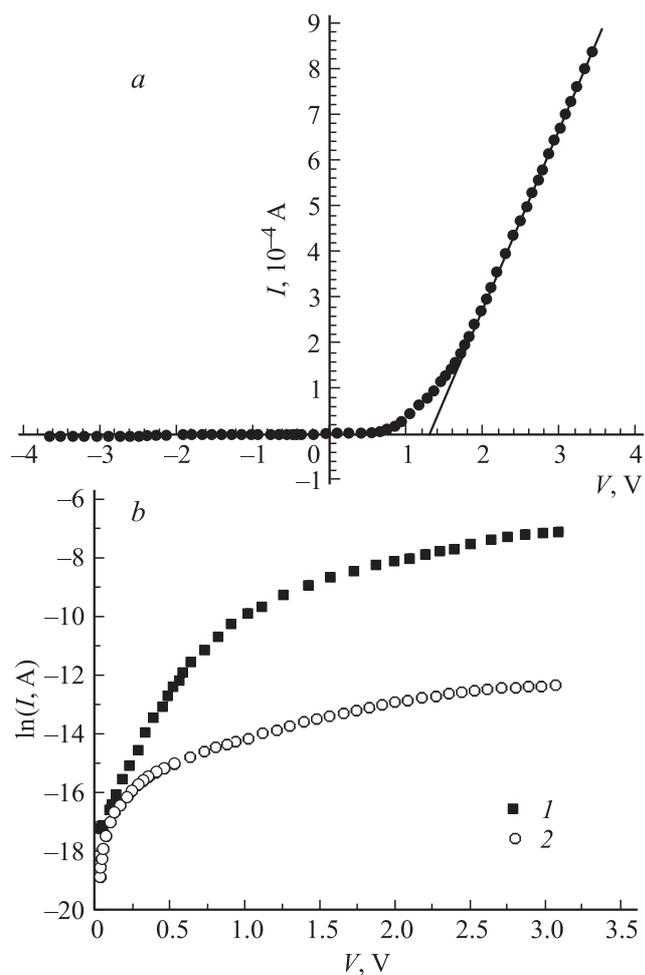
СЭ на основе CZTS в качестве барьерного перехода, как правило, включает ГП CdS/Cu₂ZnSnS₄ [5,6]. Однако с учетом современных экологических норм необходимо исключить из состава СЭ токсичный кадмий. Поэтому возникает необходимость поиска альтернативного варианта барьерного перехода СЭ на основе CZTS.

В настоящей работе исследуются создание и электрические свойства анизотипных ГП *p*-Cu₂ZnSnS₄/*n*-Si на подложке из поликристаллического Si.

Формирование тонкого слоя CZTS на Si-подложке осуществлялось в два этапа. На первом этапе на подложке из поликристаллического Si методом вакуумного напыления образовывали базовые слои компонентов. Процесс проводился в вакууме $(3-5) \cdot 10^{-5}$ mm Hg. На втором этапе производилась сульфидизация базового слоя из неограниченного источника, в закрытом объеме. Процесс формирования пленки CZTS проводился путем термического отжига образцов с базовыми слоями при температурах 400–620°C, время отжига выбиралось в интервале 15–90 min. После отжига образцы остывали до 200°C со скоростью 10–15°C/min, а затем температуру довели до комнатной, вытаскивая ампулы из печи.

Измерены электрические параметры полученных пленок. Все образцы, полученные без специального легирования, обладали дырочным типом проводимости. Это, по-видимому, связано с тем, что при формировании пленок CZTS образуются такие структурные дефекты, как вакансии атомов меди — V_{Cu} и замещения атомом меди узла цинка — Cu_{Zn} [7]. Поверхностное сопротивление пленок CZTS составляло в пределах 30–55 Ω/sq.

Измеряли стационарные вольт-амперные характеристики (ВАХ) созданных ГП *p*-Cu₂ZnSnS₄/*n*-Si при комнатной температуре. Омические контакты к структурам получили нанесением эвтектического состава сплава индий-галлий. Прямые и обратные ветви ВАХ $I(V)$ -гетероструктуры приведены на рисунке. Из рисунка, *a* видно, что гетероструктура обладает четко выраженными диодными характеристиками. Причем пропускное направление во всех ГП наблюдается при подаче положительной полярности внешнего смещения на пленку CZTS, что согласуется с зонной моделью исследуемого ГП [8]. Коэффициенты выпрямления в лучших структурах при $|V| = 1-2$ V достигали до зна-



Стационарная ВАХ ГП $p\text{-Cu}_2\text{ZnSnS}_4/n\text{-Si}$ при $T = 300\text{ K}$ в линейном (а), полулогарифмическом (b) и двойном логарифмическом масштабе (c). 1 — прямая ветвь, 2 — обратная ветвь.

чений $K = 65\text{--}110$. Полученные сравнительно небольшие значения K , по-видимому, связаны с несовершенством переходной области ГП.

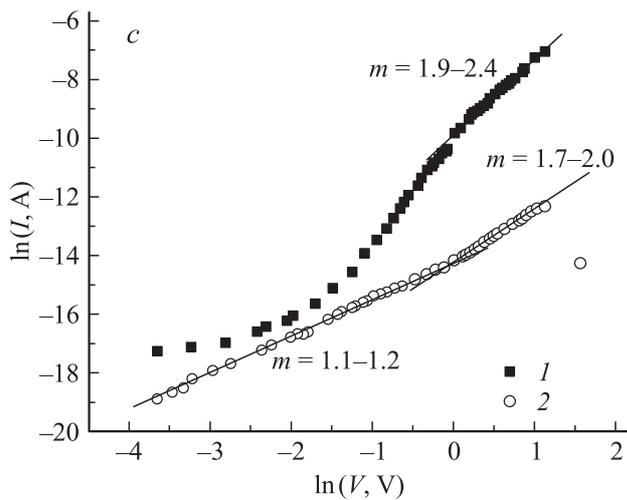


Рисунок (продолжение).

В области прямых напряжений $V < 0.35$ В (рисунок, *b*, кривая 1) прямой ток возрастает по следующему экспоненциальному закону:

$$I = I_s \exp(eV/nkT),$$

где I_s — ток насыщения, n — диодный показатель. Оценка их величин дала следующие результаты: $I_s = 8 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-8}$ А, $n = 3-4$ при $T = 300$ К. Анализ этих величин показывает, что при небольших напряжениях в ГП более вероятным является туннельно-рекомбинационный механизм токопереноса.

Как видно из рисунка, *c* (кривая 1), при напряжениях $0.35 < V < 2$ В проявляется степенной механизм токопереноса, т.е. прямой ток подчиняется закону $I \sim V^m$. Значение показателя степени m для различных структур составляло в пределах 1.9–2.4. Это указывает на преобладание токов, ограниченных пространственным зарядом в режиме подвижности [9]

$$I = (8\epsilon\epsilon_0\mu_p S/d^3)V^2, \quad (1)$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость CZTS, ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума, S — площадь ГП, d — толщина подложки.

Из рисунка, *a* видно, что прямая ветвь ВАХ ГП $p\text{-Cu}_2\text{ZnSnS}_4/n\text{-Si}$ при напряжении $V > 2\text{ V}$ подчиняется следующему линейному закону:

$$V = V_0 + IR_B,$$

где V_0 — напряжения отсечки, R_B — сопротивление базы. Для ГП $p\text{-Cu}_2\text{ZnSnS}_4/n\text{-Si}$ их величины составляли 1.4 V и $(3.5\text{--}6.6) \cdot 10^3\ \Omega$ соответственно. Изменение сопротивления базы в достаточно широких пределах, по-видимому, связано с изменениями условий кристаллизации пленок CZTS.

При обратном смещении ГП $p\text{-Cu}_2\text{ZnSnS}_4/n\text{-Si}$ (см. рисунок, *b, c*, кривые 2) зависимость тока от напряжения также подчиняется степенному закону $I \sim V^m$ во всем интервале напряжений. Как видно из рисунка, *c* (кривая 2), на обратных ветвях ВАХ можно условно выделить два участка. Для значений $|V| < 1\text{ V}$ показатель степени составляет $m = 1.1\text{--}1.2$. При увеличении напряжения ($|V| > 1\text{ V}$) показатель степени увеличится до $m \approx 2$, в этой области ВАХ может быть описана с помощью квадратического закона (1).

Таким образом, впервые получены анизотипные ГП $p\text{-Cu}_2\text{ZnSnS}_4/n\text{-Si}$ сульфидацией базовых металлических слоев, предварительно напыленных на подложку из поликристаллического кремния. Из анализа ВАХ ГП $p\text{-Cu}_2\text{ZnSnS}_4/n\text{-Si}$ установлены доминирующие механизмы токопереноса. При небольших прямых напряжениях ($V < 0.35\text{ V}$) в ГП более вероятным является туннельно-рекомбинационный процесс. В области напряжений $0.35 < V < 2\text{ V}$ преобладает ток, ограниченный пространственным зарядом в режиме подвижности (квадратичный закон). При напряжениях $V > 2\text{ V}$ ВАХ изменяется по линейной зависимости. При обратном смещении в гетеропереходе преобладают токи, ограниченные пространственным зарядом.

Список литературы

- [1] Sze S.M., Kwok K.N. Physics of semiconductor device. New Jersey, Wiley, 2007. 245 p.
- [2] Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: Теория и эксперимент. М.: Энергоатомиздат, 1987. 280 с. (Пер. с англ.: *Fahrenbruch A.L., Bube R.H.* Fundamentals of solar cells. Photovoltaic solar energy conversion. N.Y., 1983. 280 p.).

- [3] *Hossain M.I.* // Chalcogenide Lett. 2012. V. 9. N 6. P. 231–242.
- [4] *Persson C.J.* // Appl. Phys. 2010. V. 107. P. 053710 (1–8).
- [5] *Katagiri H., Jimbo K., Jamada S.* et al. // Appl. Phys. Express. 2008. P. 041201.
- [6] *Wang K., Gunawang O., Todorov T.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 97. P. 144–150.
- [7] *Гук М.С.* Автореферат докторской диссертации. Кишинев: Ин-т прикладной физики АН Молдавии, 2014.
- [8] *Юсупов А., Адамбаев К., Тураев З.З.* // Гелиотехника. 2015. № 3. С. 52–55.
- [9] *Ламперт Г., Марк П.* Инжекционные токи в твердых телах. М.: Мир, 1973. 414 с.