

К. ф.-м. н. Т. Т. КОВАЛЮК, к. т. н. М. Н. СОЛОВАН, к. т. н. А. И. МОСТОВОЙ,
к. ф.-м. н. Э. В. МАЙСТРУК, Г. П. ПАРХОМЕНКО, д. ф.-м. н. П. Д. МАРЬЯНЧУК

Украина, Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича

E-mail: tarik-1006@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛОВ $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ И ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ НА ИХ ОСНОВЕ

Представлены результаты исследований магнитных, кинетических и оптических свойств кристаллов $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$. Методом магнетронного осаждения тонких пленок TiN , TiO_2 и MoO_x на подложки из кристаллов $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ изготовлены анизотипные гетеропереходы $n\text{-TiN}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$, $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ и $n\text{-MoO}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$. Исследованы их электрические свойства и установлены доминирующие механизмы токопереноса при прямом и обратном смещениях.

Ключевые слова: кристалл, магнитная восприимчивость, гетеропереход, тонкая пленка.

В настоящее время ведутся интенсивные исследования в направлении создания полупроводниковых материалов на основе сульфидов Cu, Zn и Sn (CZTS) [1, 2], альтернативным традиционным высокоэффективным соединениям CuInSe_2 (CIS), $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ (CIGS) и CdTe . Это обусловлено такими характеристиками CZTS, как близкая к оптимальной для преобразования солнечной энергии ширина запрещенной зоны ($E_g \approx 1,5$ эВ), высокий коэффициент поглощения света (около 10^5 см^{-1}), большое время жизни носителей заряда, а также достаточно высокая их подвижность. В отличие от других полупроводников, это соединение не содержит редких и экологически опасных материалов, элементы, входящие в его состав, широко распространены в земной коре, а стоимость их добычи невысока. Именно это вызвало интерес к исследованию физических свойств новых соединений $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$, поскольку замена серы теллуром позволяет изменить ширину запрещенной зоны, а также снизить температуру плавления при получении объемных кристаллов.

Также неуклонно растет интерес к полупроводниковым гетеропереходам благодаря ряду их преимуществ по сравнению с гомопереходами. Сейчас гетеропереходы активно используются в электронике, лазерах, фотовольтаике [3, 4]. В то же время, существует значительный интерес к созданию гетеропереходов, в которых в качестве окна используются широкозонные проводящие прозрачные оксиды (например, TiO_2) или нитриды (TiN). Это перспективные широкозонные материалы, обладающие удачной совокупностью физико-химических параметров, таких как низкое удельное сопротивление, достаточно высокий коэффициент пропускания в видимой части спектра, высокая твердость, высокая износостойкость, хорошая химическая инертность и

стойкость к коррозии [3]. Диоксид титана широко применяется в солнечных элементах в качестве просветляющего покрытия, фронтального проводящего контакта, диэлектрического слоя, материала для формирования гетеропереходов [4], нитрид титана используется в оптических фильтрах, тонкопленочных резисторах, защитных и декоративных покрытиях.

Целью данной работы является исследование магнитных, кинетических и оптических свойств кристаллов $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ и определение их параметров, а также создание гетеропереходов на их основе.

Методика эксперимента

Кристаллы $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ были получены нами методом синтеза — путем непосредственного сплавления компонентов. В качестве исходных веществ для синтеза сплавов $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ использовали элементарные (ОСЧ) вещества. Температуру синтеза и выращивания кристаллов подбирали экспериментально.

Ампулы изготавливали из толстостенного кварца с вытянутым конусообразным концом. Для того чтобы предотвратить взаимодействие загружаемого материала с кварцем, ампулы графитизировали, после чего они сушились в вакуумном шкафу и находились в вакууме до загрузки в ампулу шихты.

Для изготовления гетероструктур использовали кристаллы $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ p -типа проводимости. Концентрация носителей заряда при температуре 295 К составляла $p = 2,9 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

Структуры изготавливали нанесением пленок TiN , TiO_2 , MoO_x на предварительно обработанную (шлифовкой, полировкой) поверхность кристаллов $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ (типоразмером примерно $7 \times 7 \times 1$ мм) в универсальной вакуумной установке Leybold-Heraeus L560 с помощью реактив-

ного магнетронного распыления мишени чистого титана в атмосфере смеси аргона и азота для TiN, аргона и кислорода для TiO₂, а также распыления мишени чистого молибдена в атмосфере смеси аргона и кислорода для MoO_x при постоянном напряжении.

Подложки размещались над магнетроном на вращающемся столике (для обеспечения однородности пленок по толщине). Перед началом процесса напыления вакуумная камера откачивалась до остаточного давления $5 \cdot 10^{-3}$ Па.

В течение процесса напыления газовая смесь формировалась в необходимой пропорции из двух независимых источников. Для удаления неконтролируемого загрязнения поверхности мишени и подложек использовали кратковременное протравливание бомбардирующими ионами аргона.

Технологические параметры процесса напыления, такие как парциальные давления газов P_{Ar} , P_{N_2} , P_{O_2} в вакуумной камере, мощность магнетрона P_m , продолжительность процесса напыления t и температура подложек $T_{п}$, приведены в **таблице**.

Технологические параметры процесса напыления

Пленки	$T_{п}$, К	t , мин	P_m , Вт	P_{Ar} , Па	P_{N_2} , Па	P_{O_2} , Па
TiN	570	15	120	0,35	0,7	—
TiO ₂	570	20	300	0,7	—	0,02
MoO _x	570	10	120	0,24	—	0,034

Исследование магнитных свойств кристаллов Cu₂ZnSnTe₄ проводилось методом Фарадея в интервале температур $T=290-330$ К и магнитных полей $H=0,25-4$ кЭ. Измерения магнитной восприимчивости χ проводились относительно эталона с известным ее значением, исследуемые образцы (массой около 200 мг) размещались в тех точках магнитного поля, где находился эталонный образец при градуировке установки. Для регистрации взаимодействия исследуемого образца с магнитным полем использовались электронные весы ЭМ-И-ЗМ с чувствительностью 1 мкг.

Регистрация измеряемого сигнала проводилась с помощью универсального цифрового вольтметра Picotest M3500A с погрешностью $\pm(0,004...0,008)\%$ в зависимости от предела измерений, поэтому случайная погрешность была незначительной. Проведенные оценки показывают, что суммарная погрешность при измерении магнитной восприимчивости, состоящая в основном из систематической погрешности, связанной с определением массы образца и эталона, а также с неточностью расположения образца в магнитном поле, и случайной погрешности, обусловленной неточностью измерения величины сигнала, не превысила 1%.

Исследования кинетических коэффициентов проводились на образцах размером $8 \times 2 \times 1,5$ мм

при $T=290-340$ К и $H=0,5-5$ кЭ, суммарная погрешность при определении электропроводности составляла примерно 2%, коэффициента Холла 6%, при измерении коэффициента термо-эдс не превышала 6%.

Измерения коэффициента отражения R выполняли на спектрометре Nicolet 6700 с использованием приставки Pike [5] в интервале длины волны $\lambda=0,9-26,6$ мкм. Угол падения луча в приставке Pike можно изменять от 30 до 80°.

Вольт-амперные характеристики (**ВАХ**) гетероструктур измеряли по стандартной методике с использованием источника постоянного тока BVP Electronics, в качестве амперметра использовался точный мультиметр Fluke 5545A, а в качестве вольтметра — Picotest M3500A.

Физические свойства кристаллов Cu₂ZnSnTe₄

Из проведенных исследований магнитной восприимчивости установлено, что образцы кристаллов Cu₂ZnSnTe₄ диамагнитны, т. е. их магнитная восприимчивость почти не зависит от магнитного поля и температуры и равна $\chi_{об}=-0,25 \cdot 10^{-6}$ см³/г.

Как видно из **рис. 1**, полученные температурные зависимости электропроводности для исследованных образцов Cu₂ZnSnTe₄ имеют такой же характер, что и для металлов, т. е. значение уменьшается с ростом температуры, что обусловлено уменьшением подвижности носителей заряда при росте T .

Коэффициент Холла $R_H=1/(ep)$, где e — заряд электрона, для кристаллов Cu₂ZnSnTe₄ практически не зависит от температуры (см. вставку на рис. 1), что указывает на вырожденный газ носителей заряда в полупроводнике.

Коэффициент термо-эдс для всех образцов имеет положительное значение, что также указывает на преобладание p -типа проводимости.

Проведенные исследования коэффициента отражения R показали, что его величина остается

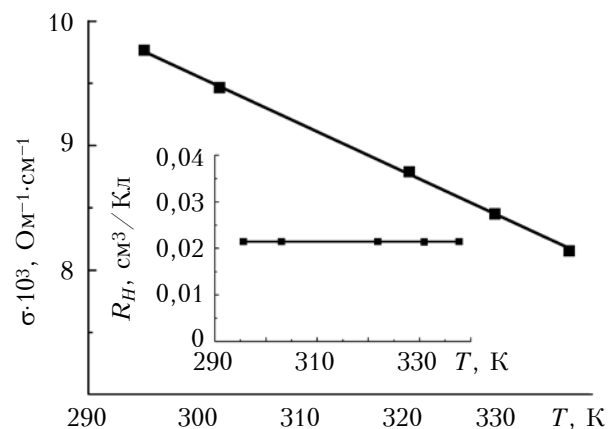


Рис. 1. Температурные зависимости удельной электропроводности и коэффициента Холла (*вставка*) кристаллов Cu₂ZnSnTe₄

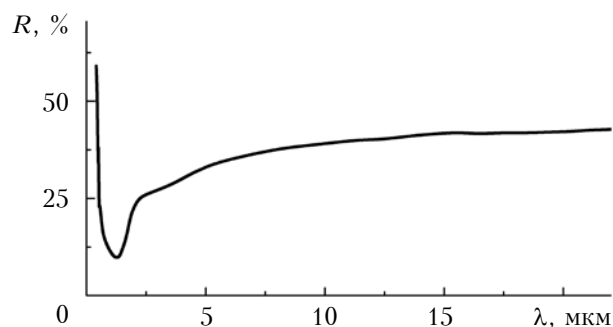


Рис. 2. Спектральная зависимость коэффициента отражения образцов $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ от длины волны электромагнитного излучения при угле его падения 30°

ся практически постоянной при изменении угла падения электромагнитного излучения, поэтому можно принять $R=R(0^\circ)=R(30^\circ)$ в области собственного поглощения.

Исследования спектральной зависимости коэффициента отражения образцов $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ от длины волны электромагнитного излучения показали наличие его плазменного минимума в коротковолновой части спектра (рис. 2).

Электрические свойства и механизмы токопереноса анизотипных гетероструктур $n\text{-TiN}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$, $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$, $n\text{-MoO}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$

Вольт-амперные характеристики трех анизотипных гетеропереходов, измеренные при комнатной температуре, представлены на рис. 3. Для первых двух были определены коэффициенты выпрямления k при внешнем смещении 0,6 В, высота потенциального барьера ϕ_0 (путем экстраполяции прямолинейного участка ВАХ при прямом смещении до пересечения с осью напряжений) и последовательное сопротивление (по формуле $R_S = \Delta U / \Delta I$):

- $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ (кривая 1):
 $k=50$, $\phi_0=0,42$ В, $R_S=39$ Ом;
- $n\text{-TiN}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ (кривая 2):
 $k=27$, $\phi_0=0,23$ В, $R_S=8$ Ом.

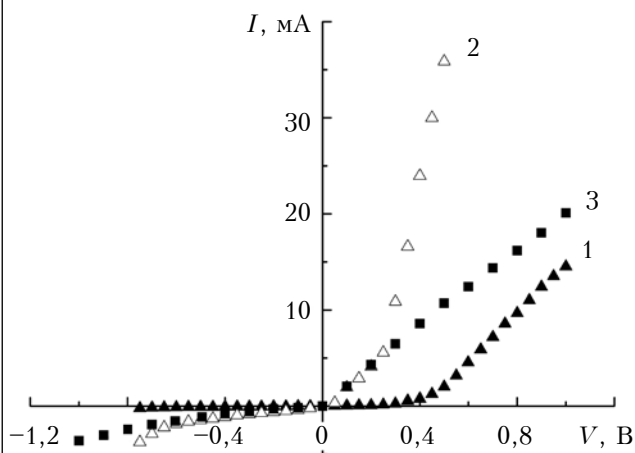


Рис. 3. ВАХ гетеропереходов при 295 К:
 1 — $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$; 2 — $n\text{-TiN}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$;
 3 — $n\text{-MoO}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$

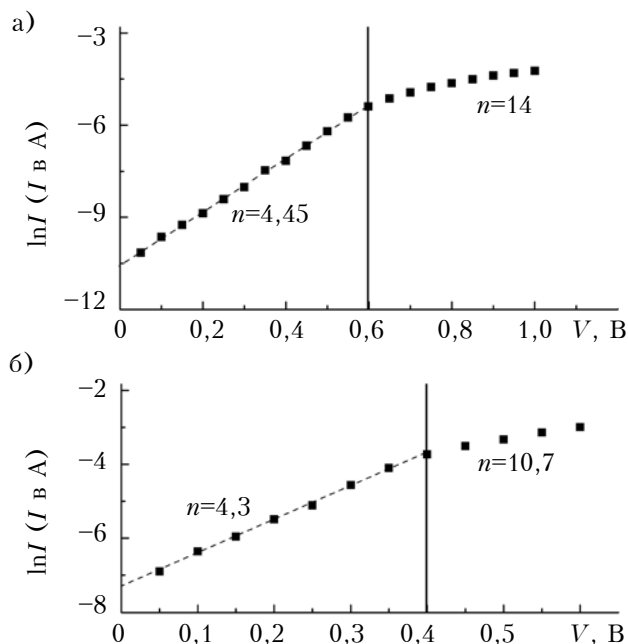


Рис. 4. Прямые ветви ВАХ гетеропереходов $n\text{-TiN}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ (а) и $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ (б)

Анализ ВАХ структур $n\text{-MoO}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ (кривая 3) не проводился, поскольку их коэффициент выпрямления очень мал: $k \approx 5$.

На рис. 4 представлены прямые ветви ВАХ гетеропереходов $n\text{-TiN}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ и $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ в полулогарифмических координатах для удобства анализа доминирующих механизмов токопереноса при прямом смещении. Анализ показал, что графики зависимости $\ln I = f(V)$ исследуемых гетеропереходов состоят из двух прямолинейных участков, что свидетельствует об экспоненциальной зависимости тока от напряжения и наличии двух доминирующих механизмов токопереноса в исследуемом интервале напряжений.

Из формулы $\Delta \ln I / \Delta V = e / (nkT)$ были определены значения коэффициента неидеальности n гетеропереходов для обоих участков напряжений:

- $n\text{-TiN}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$:
 $n=4,45$ при $0 < V < 0,6$ В, $n=14$ при $0,6 < V < 1,0$ В;
- $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$:
 $n=4,3$ при $0 < V < 0,4$ В, $n=10,7$ при $0,4 < V < 0,6$ В.

Таким образом, при небольших прямых смещениях для исследуемых гетеропереходов значение n превышает 2, что свидетельствует о доминировании туннельной модели токопереноса. При этом, поскольку при очень малых прямых смещениях область пространственного заряда еще недостаточно тонка для прямого туннелирования, единственным физически обоснованным механизмом токопереноса является многоступенчатый туннельно-рекомбинационный с участием поверхностных состояний на границах раздела $\text{TiN}/\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$, $\text{TiO}_2/\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$, образованных из-за несовпадения периодов кристаллических решеток материалов компонентов исследуемых гетеропереходов [6].

Ток при прямом смещении определяется следующим выражением [7]:

$$I = B \exp(-\alpha(\phi_0(T) - eV)), \quad (1)$$

где B — величина, которая слабо зависит от температуры и напряжения;

α — характеристика материала.

Выражение (1) можно переписать в другом виде:

$$I = B \exp(-\alpha\phi_0(T)) \exp \alpha e V.$$

С учетом того, что $I_0 = B \exp(-\alpha\phi_0(T))$ — ток отсечки, который не зависит от приложенного напряжения, получим

$$I = I_0 \exp \alpha e V. \quad (2)$$

Из этого выражения следует, что наклон начальных участков прямых ветвей ВАХ ($\Delta \ln I / \Delta V$) определяется коэффициентом α , который равен $8,8 \text{ эВ}^{-1}$ для $n\text{-TiN}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ и $9,2 \text{ эВ}^{-1}$ для $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$.

Прологарифмировав выражение для тока отсечки I_0 , получим

$$\ln I_0 = \ln B - \alpha\phi_0(T). \quad (3)$$

Если значение высоты потенциального барьера и коэффициента α известны, тогда B можно легко вычислить из уравнения (3):

$$B = \exp(\alpha\phi_0(T) - \ln I_0).$$

Получено: $B = 1,07 \cdot 10^{-3} \text{ А}$ для $n\text{-TiN}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$, $B = 5,9 \cdot 10^3 \text{ А}$ для $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$.

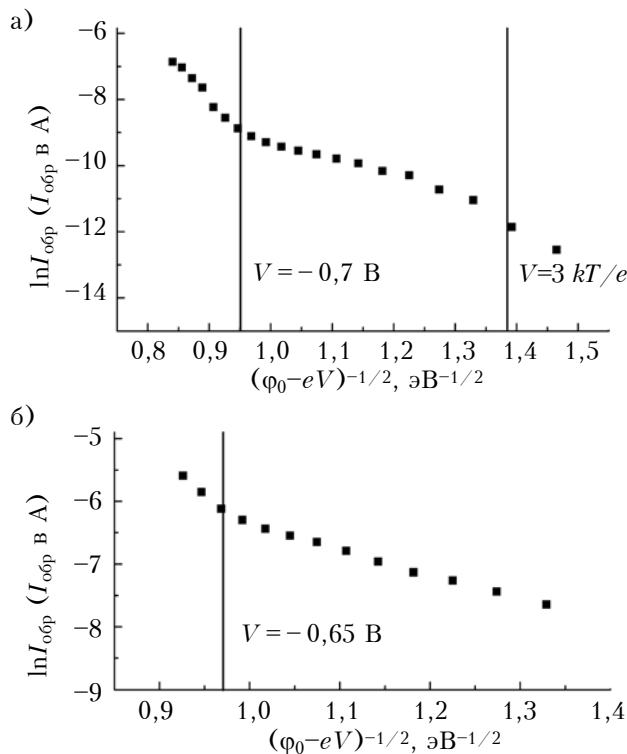


Рис. 5. Обратная ветвь ВАХ гетеропереходов $n\text{-TiN}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ (а) и $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ (б)

При $V > 0,6 \text{ В}$ для $n\text{-TiN}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ и при $V > 0,4 \text{ В}$ для $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ область пространственного заряда достаточно тонка, и тут уже становится возможным прямое туннелирование, которое описывается формулой Ньюмена для туннельного механизма токопереноса [7]:

$$I = I_t \exp \gamma V, \quad (4)$$

где $I_t = I_t^0 \exp \beta T$ — ток отсечки; β, γ — константы.

Из последнего выражения видно, что наклон прямых ветвей ВАХ определяется коэффициентом γ , который равен $2,8 \text{ эВ}^{-1}$ для $n\text{-TiN}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ и $3,6 \text{ эВ}^{-1}$ для $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$.

Обратный ток через исследуемые гетеропереходы в области смещений от $V = 3kT/e$ до $0,7 \text{ В}$ для $n\text{-TiN}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ и до $0,65 \text{ В}$ для $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ (рис. 5) описывается соотношением $I_{\text{обр}} \sim \exp[(\phi_0 - qV)^{-1/2}]$, что свидетельствует о доминировании туннельного механизма токопереноса при приложении внешнего напряжения в обратном направлении. В области смещений $V > 0,7 \text{ В}$ для $n\text{-TiN}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ отклонение экспериментальных точек от прямой обусловлено лавинным размножением носителей заряда в результате ударной ионизации.

Выводы

Проведенные исследования показали, что кристаллы $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ обладают p -типом проводимости, их коэффициент Холла практически не зависит от температуры, а электропроводность уменьшается с ее ростом. В гетероструктурах $n\text{-TiN}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$, $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$, полученных методом магнетронного осаждения тонких пленок TiN , TiO_2 на кристаллы $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$, доминирующими механизмами токопереноса являются туннельно-рекомбинационный и туннелирование Ньюмена при прямом смещении и туннелирование при обратном. Анализ механизмов токопереноса в гетероструктурах $n\text{-MoO}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ не проводился, поскольку их коэффициент выпрямления очень мал ($k \approx 5$).

Результаты данных исследований могут быть использованы для лучшего понимания процессов, протекающих в материалах $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ и в структурах, созданных на их основе, для дальнейшего улучшения их свойств и параметров.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Wang W., Winkler M. T., Gunawan O. et al. Device characteristics of CZTS thin-film solar cells with 12.6% efficiency // Advanced energy materials. — 2014. — Vol. 4. — P. 1–5. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/aenm.201301465>.
2. Hironori Katagiri, Kazuo Jimbo, Win Shwe Maw et al. Development of CZTS-based thin film solar cells // Thin Solid Films. — 2009. — Vol. 517, N 7. — P. 2455–2460. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2008.11.002>.
3. Алферов Ж. И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур // ФТП. — 1998. — № 32/1. — С. 3–18.
4. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: Теория и эксперимент. — Москва: Энергоатомиздат, 1987.

5. Ковалюк Т. Т., Марьянчук П. Д., Майструк Э. В., Козьярский Д. П. Оптические свойства кристаллов $\text{Hg}_{1-x-y}\text{Cd}_x\text{Dy}_y\text{Se}$ Изв. Вузов. Физика. — 2013. Т. 56, № 7. — С. 98 — 103.

6. Solovan M. N., Brus V. V., Maryanchuk P. D. et al. Fabrication and characterization of anisotype heterojunctions $n\text{-TiN}/p\text{-CdTe}$ // Semiconductor science and technology

gy. — 2014. — Vol. 29, N 015007. — <http://dx.doi.org/10.1088/0268-1242/29/1/015007>.

7. Шарма Б. Л., Пурохит Р. К. Полупроводниковые гетеропереходы. — Москва: Сов. Радио, 1979.

Дата поступления рукописи
в редакцию 23.06 2015 г.

Т. Т. КОВАЛЮК, М. М. СОЛОВАН, А. І. МОСТОВИЙ,
Е. В. МАЙСТРУК, Г. П. ПАРХОМЕНКО, П. Д. МАР'ЯНЧУК

Україна, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

E-mail: tarik-1006@mail.ru

ДОСЛІДЖЕННЯ КРИСТАЛІВ $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ ТА ГЕТЕРОПЕРЕХОДІВ НА ЇХ ОСНОВІ

Представлено результати досліджень магнітних, кінетичних і оптичних властивостей кристалів $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$. Методом магнетронного напилення тонких плівок TiN , TiO_2 та MoO_x на підкладки з кристалів $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ виготовлено анізотипні гетеропереходи $n\text{-TiN}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$, $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ і $n\text{-MoO}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$. Досліджено їх електричні властивості і встановлено домінуючі механізми струмопереносу при прямих і зворотних зміщеннях.

Ключові слова: кристал, магнітна сприйнятливості, гетероперехід, тонка плівка.

DOI: 10.15222/TKEA2015.5-6.49

UDC 621.315.592

T. T. KOVALIUK, M. N. SOLOVAN, A. I. MOSTOVIYI,
E. V. MAISTRUK, G. P. PARKHOMENKO, P. D. MARYANCHUK

Ukraine, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

E-mail: tarik-1006@mail.ru

RESEARCH ON $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ CRYSTALS AND HETEROJUNCTIONS BASED ON SUCH CRYSTALS

The paper reports on the results of the studies of magnetic, kinetic and optical properties of $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ crystals. The $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ crystals showed diamagnetic properties (the magnetic susceptibility almost independent of the magnetic field and temperature). The $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ crystals possessed p-type of conductivity and the Hall coefficient was independent on temperature. The temperature dependence of the electrical conductivity of the $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ crystal shows metallic character, i. e. decreases with the increase of temperature, that is caused by the lower charge carrier mobility at higher temperature. Thermoelectric power of the samples is positive that also indicates on the prevalence of p-type conductivity.

Heterojunctions $n\text{-TiN}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$, $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ and $n\text{-MoO}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ were fabricated by the reactive magnetron sputtering of TiN , TiO_2 and MoO_x thin films, respectively, onto the substrates made of the $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ crystals. The dominating current transport mechanisms in the $n\text{-TiN}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ and $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ heterojunctions were established to be the tunnel-recombination mechanism at forward bias and tunneling at reverse bias.

Keywords: crystal, magnetic susceptibility, heterojunctions, thin film.

REFERENCES

1. Wang W., Winkler M. T., Gunawan O., Gokmen T., Todorov T. K., Zhu Y., Mitzi D. B. Device characteristics of CZTSSe thin-film solar cells with 12.6% efficiency. *Advanced Energy Materials*, 2014, vol. 4, pp. 1-5. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/aenm.201301465>.

2. Hironori Katagiri, Kazuo Jimbo, Win Shwe Maw, Koichiro Oishi, Makoto Yamazaki, Hideaki Araki, Akiko Takeuchi. Development of CZTS-based thin film solar cells. *Thin Solid Films*, 2009, vol. 517, no. 7, pp. 2455-2460. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2008.11.002>.

3. Alferov Zh. I. The history and future of semiconductor heterostructures. *Semiconductors*, 1998, vol. 32, is. 1, pp. 1-14.

4. Fahrenbruch A.L., Bube R.H. Fundamentals of solar cells. *Photovoltaic solar energy conversion*. New York, 1983.

5. Kovaliuk T. T., Maryanchuk P. D., Maistruk E. V., Kozziarskyi D. P. Optical properties of $\text{Hg}_{1-x-y}\text{Cd}_x\text{Dy}_y\text{Se}$ crystals. *Russian Physics Journal*, 2013, vol. 56, no. 7, pp. 831-836. <http://dx.doi.org/10.1007/s11182-013-0106-5>.

6. Solovan M.N., Brus V.V., Maryanchuk P.D., Ilashchuk M.I., Rappich J., Nickel N., Abashin S.L. Fabrication and characterization of anisotype heterojunctions $n\text{-TiN}/p\text{-CdTe}$. *Semiconductor Science and Technology*, 2014, vol. 29, no. 015007. <http://dx.doi.org/10.1088/0268-1242/29/1/015007>.

7. Sharma B.L., Purohit R.K. *Semiconductor heterojunctions*. Pergamon Press, 1974.