

Электрофизические свойства гетероструктур $n\text{-ZnO}/p\text{-CuO}$

© Б.М. Верменичев, О.Л. Лисицкий, М.Е. Кумеков, С.Е. Кумеков[¶], Е.И. Торуков*, С.Ж. Токмолдин

Казахский национальный технический университет им. К.И. Сатпаева,
500013 Алматы, Казахстан

* Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 20 июля 2006 г. Принята к печати 28 июля 2006 г.)

Получена гетероструктура $n\text{-ZnO}/p\text{-CuO}$ и измерена ее вольт-амперная характеристика. Показано, что в температурную зависимость проводимости гетероструктуры основной вклад вносит слой CuO и собственно гетеропереход $n\text{-ZnO}/p\text{-CuO}$.

PACS: 73.40.Lq

1. Введение

Возрастающий интерес к электронно-дырочным переходам на основе оксида цинка связан с уникальными свойствами этого материала. Технология получения таких переходов представляет значительный интерес и развита в ряде работ [1–8]. Совершенные n – p -переходы на основе $n\text{-ZnO}$ реализованы в структурах с p -областью из различных материалов (Si , Sr_2CuO_2 , $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$, CuPc/Si). В настоящей работе сделаны попытки получить анизотипный гетеропереход $n\text{-ZnO}/p\text{-CuO}$. Основанием для таких опытов послужило наличие в элементарных ячейках кристаллических решеток оксида цинка и оксида меди почти одинаковых граней и сообщение об успешном получении гетероперехода в системе $n\text{-SnO}_2/p\text{-CuO}$ [9].

2. Методика получения гетероперехода

Технология получения гетероструктуры $n\text{-ZnO}/p\text{-CuO}$ включала последовательные этапы образования слоя $p\text{-CuO}$ и осаждения слоя $n\text{-ZnO}$. Пленки оксида меди были получены с помощью предварительного магнетронного напыления меди на стеклянные подложки и последующего их отжига на воздухе. Окисление пленок меди проводилось по методике, аналогичной методике получения пленок ZnO , при помощи термического окисления, описанного в работе [10]. Отжиг пленок меди проводился в течение 1 ч при 500°C . Идентификация кристаллической структуры полученных пленок осуществлялась на основе рентгеноструктурного анализа (описанного далее) и свидетельствовала об образовании пленок оксида меди. На поверхность пленок CuO наносились пленки ZnO с помощью ионно-плазменного распыления Zn в присутствии кислорода. Свойства пленок, получаемых этим методом, описаны в работах [11,12]. Этот метод принципиально отличается от метода с использованием термического окисления тем, что на поверхность подложки, являющейся в нашем случае

пленкой оксида меди, можно непосредственно осаждать не цинк, а молекулы оксида цинка.

3. Свойства слоев, составляющих гетеропереход

С целью изучения электрических свойств нейтральных слоев, образующих гетероструктуру, исследовались полученные отдельно по вышеприведенной технологии пленки CuO и ZnO . Пленки наносились на стеклянные подложки. Толщина исследуемых пленок была в пределах 50–200 нм. Толщина оценивалась с помощью эллипсометра (длина волны излучения $\lambda = 594$ нм). Тип проводимости пленок определялся методом термоэдс. Пленки CuO имели p -тип проводимости, пленки ZnO имели n -тип проводимости.

Удельное сопротивление пленок определялось четырехзондовым методом (метод ван дер Пау с прижимными контактами). После отжига на воздухе при 500°C пленки $n\text{-ZnO}$ при комнатной температуре имели удельное сопротивление более $7 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (поверхностное сопротивление на 0.5 см длины пленки составляло $\geq 200 \text{ МОм}$). Удельное сопротивление пленок CuO при комнатной температуре было $\rho \approx 0.2\text{--}0.3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Для определения фазового состава и кристаллической структуры пленок $p\text{-CuO}$ был проведен рентгеноструктурный анализ образцов (метод Дебая–Шеррера). Для получения рентгенограммы использовалась цилиндрическая камера стандартного размера $R = 57.3$ мм, излучение медной трубки — линия $\text{CuK}_{\alpha 1}$ с длиной волны $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$, время экспозиции 36 ч, анализ проводился по методике [13]. Для идентификации состава использовались литературные данные [14] для Zn , ZnO , ZnO_2 , Cu , CuO , Cu_2O . На рентгенограмме, снятой асимметричным способом, проявились 2 линии, соответствующие наиболее интенсивным линиям CuO (межплоскостные расстояния 2.31 и 2.51 \AA).

Структурный состав исследуемых пленок оксида цинка определялся на установке ДРОН-6 (метод вращения). Использовалось рентгеновское излучение от медной трубки с графитовым монохроматором, эффективная длина волны рентгеновского излучения $\text{CuK}_{\alpha 1}$

[¶] E-mail: kumekov@ntu.kz

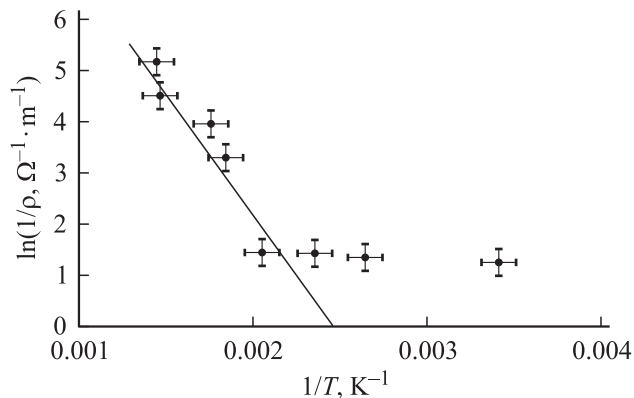


Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления ρ пленки CuO толщиной 50 нм от температуры измерения T . Наклон прямой линии соответствует 0.8 эВ.

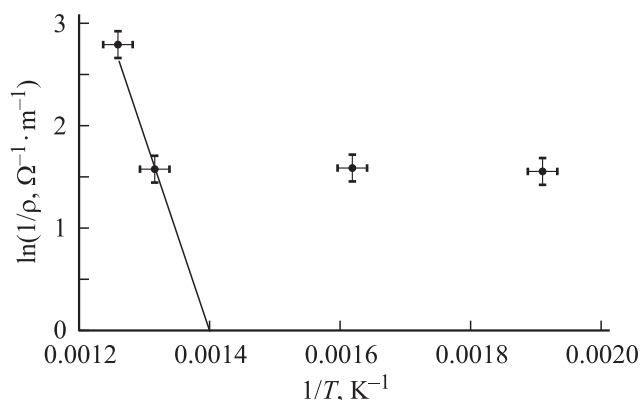


Рис. 2. Зависимость удельного сопротивления ρ пленки ZnO толщиной 180 нм от температуры измерения T . Наклон прямой линии соответствует 3.3 эВ.

$\lambda = 1.54051 \text{ \AA}$. Отраженный луч регистрировался сцинтилляционным детектором с фотоумножителем. Для фазового анализа было использовано 5 максимумов брэгговского отражения. Анализ показал, что кристаллическая структура полученных пленок $n\text{-ZnO}$ — гексагональная.

Известно, что оксид меди обладает моноклинной решеткой Браве с постоянными решетки $a = 4.684 \text{ \AA}$, $b = 3.425 \text{ \AA}$, $c = 5.129 \text{ \AA}$ и углами $\beta = 99^\circ 22'$, $\alpha = \gamma = 90^\circ$. ZnO обладает гексагональной решеткой с постоянными $a = 3.2495 \text{ \AA}$, $b = 3.2495 \text{ \AA}$, $c = 5.2059 \text{ \AA}$ и углами $\alpha = \beta = 90^\circ$, $\gamma = 120^\circ$ [15]. Сравнение этих параметров показывает, что, хотя тип решеток в компонентах гетеросистемы $n\text{-ZnO}/p\text{-CuO}$ не совпадает, однако в решетках имеются почти одинаковые по геометрии грани. Поэтому можно предположить, что образование гетероперехода происходит в плоскостях, содержащих эти идентичные грани (стороны b и c имеют близкие размеры, угол α между ними одинаковый). В гексагональной решетке ZnO плоскости $(\bar{1}100)$, $(01\bar{1}0)$, $(10\bar{1}0)$, $(1\bar{1}00)$, $(0\bar{1}10)$, $(\bar{1}010)$ формируются на

плоскостях моноклинной решетки CuO (100) (если ось роста направить по ребру c).

Была исследована также температурная зависимость удельного сопротивления пленок $p\text{-CuO}$ и $n\text{-ZnO}$. На рис. 1 представлена полулогарифмическая зависимость удельной проводимости ($1/\rho$) пленки оксида меди от обратной температуры (в интервале температур $T = 20\text{--}420^\circ\text{C}$). Наклон температурной зависимости в области собственной проводимости соответствует запрещенной зоне оксида меди [15]. Измерить удельное сопротивление пленок оксида цинка четырехзондовым методом при комнатной температуре было затруднительно из-за очень большого поверхностного сопротивления. На рис. 2 приведена зависимость удельной проводимости от температуры для $n\text{-ZnO}$ в интервале $T = 224\text{--}522^\circ\text{C}$.

4. Вольт-амперная характеристика

На рис. 3 показаны статические вольт-амперные характеристики гетероперехода $n\text{-ZnO}/p\text{-CuO}$ при различных температурах измерения. Видно, что вид вольт-амперной характеристики сильно зависит от температуры измерения. Вольт-амперная характеристика при $T = 250^\circ\text{C}$ выглядит пологой, что свидетельствует о значительном вкладе в проводимость структуры в прямом направлении последовательных с $n\text{--}p$ -переходом слоев $p\text{-CuO}$ и $n\text{-ZnO}$.

Сравнение температурных зависимостей проводимости пленок $p\text{-CuO}$ (рис. 1) и $n\text{-ZnO}$ (рис. 2) показывает, что в исследованном интервале температур сильно убывает удельное сопротивление $p\text{-CuO}$, в то время

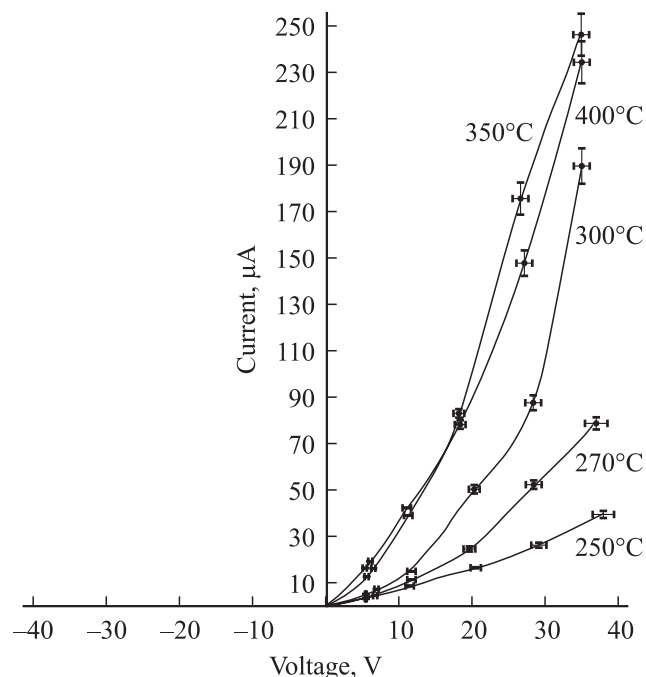


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики гетероперехода $p\text{-CuO}/n\text{-ZnO}$ при различных температурах измерения.

как удельное сопротивление n -ZnO остается практически неизменным. Следовательно, если проводимость системы можно представить как проводимость перехода n -ZnO/ p -CuO, последовательно с которым соединены сопротивления объемной области ZnO и объемной области CuO, то при температурах вблизи 250°C в сопротивление структуры вносят соизмеримый вклад гетеропереход и объемные сопротивления n - и p -областей системы. В результате вольт-амперная характеристика гетероперехода определяется суммарным сопротивлением n - p -перехода и нейтральных областей структуры. При повышении температуры удельное сопротивление области p -CuO понижается и сопротивление системы в основном обуславливается сопротивлением n - p -перехода и области n -ZnO.

При самых высоких температурах из исследованного диапазона вольт-амперные характеристики позволяют стандартным образом оценить напряжение отсечки гетероструктуры, используя участок зависимости при максимальных плотностях тока; оно составляет $\lesssim 10$ В. Это значение превосходит теоретически возможное, что может быть объяснено отчасти сопротивлением прижимных контактов. Альтернативным объяснением может быть высокий уровень инжекции, возникновение оже-рекомбинации при максимальных плотностях тока и, как следствие, уменьшение коэффициента усиления с ростом температуры. Предполагая уровень инжекции невысоким для токов менее 80 мкА, можно оценить величину напряжения отсечки как < 3 В.

5. Обсуждение результатов

Таким образом, в настоящей работе получен гетеропереход n -ZnO/ p -CuO. Определена кристаллическая структура слоев, составляющих гетеропереход. Исследована температурная зависимость удельного сопротивления полученных отдельно слоев p -CuO и n -ZnO, составляющих гетеропереход. Измерена вольт-амперная характеристика гетероструктуры. Сделан вывод о том, что температурное поведение (в исследуемом интервале температур) прямой ветви вольт-амперной характеристики гетероструктуры определяется главным образом самим гетеропереходом и последовательным сопротивлением p -CuO.

Список литературы

- [1] С.В. Слободчиков, Х.М. Салихов, Е.В. Руссу. ФТП, **33** (4), 435 (1999).
- [2] Г.А. Ильчук, С.Е. Никитин, Ю.А. Николаев, В.Ю. Рудь, Е.И. Теруков. ФТП, **38** (11), 1349 (2004).
- [3] В.Ф. Гременок, Г.А. Ильчук, С.Е. Никитин, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь. ФТП, **39** (2), 218 (2005).
- [4] D.M. Vagnal, Y.F. Chen, Z. Zhu, T. Yao, M.Y. Shen, T. Goto. Appl. Phys. Lett., **73**, 1038 (1998).
- [5] А.Н. Георгобидани, А.Н. Грузинцев, М.О. Воробьев, У. Кайзер, В. Рихтер, И.И. Ходос. ФТП, **35** (6), 725 (2001).

- [6] А.Н. Грузинцев, В.Т. Волков, К. Бартхоу, П. Беналул. ФТП, **36** (6), 741 (2002).
- [7] В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, Н.В. Schock. ФТП, **33** (4), 484 (1999).
- [8] Б.М. Атаев, В.В. Мамедов, А.К. Омаев, Я.И. Алимов, Е.В. Калинина. Изв. РАН. Сер. физ., **69** (7), 932 (2005).
- [9] С.Е. Шуба. Интернет-журнал „Ломоносов“ (4.10.2000). <http://nature.web.ru/ab/msg.html?mid=1151717&s=120700000>
- [10] М.В. Чукиев, Я.И. Алимов, С.Д. Колониус. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, № 5, 91 (2002).
- [11] О.Л. Лисицкий, В.Б. Глазман, М.Е. Кумекон, С.Е. Кумекон, С.Ж. Токмолдин. Матер. Межд. науч.-практ. конф., посвященной 80-летию Е.А. Букетова (Караганда, 2005) т. 3, с. 620.
- [12] Б.М. Верменичев, В.Б. Глазман, Э.А. Керимов, С.Е. Кумекон, О.Л. Лисицкий, С.Ж. Токмолдин. Тр. 2 Межд. науч.-практ. конф. „Естественно-гуманитарные науки и их роль в подготовке инженерных кадров“ (Алматы, 2005) с. 11.
- [13] Н.Н. Качанов, Л.И. Миркин. Рентгеноструктурный анализ (поликристаллов) (М., Машгиз, 1960).
- [14] А.И. Китайгородский. Рентгеноструктурный анализ мелкокристаллических и аморфных тел (М., 1952).
- [15] Физико-химические свойства полупроводниковых веществ. Справочник (М., Наука, 1979).

Редактор Л.В. Шаронова

Electrophysical properties of n -ZnO/ p -CuO heterostructures

B.M. Vermenitchev, O.L. Lisitski, M.E. Kumekov, S.E. Kumekov, E.I. Terukov, S.Z. Tokmoldin

Kazakh National Technical University,
500013 Almaty, Kazakhstan

Abstract n -ZnO/ p -CuO heterostructure is prepared. Its current-voltage characteristic is measured. It has been shown that the temperature dependence of the conductivity of n -ZnO/ p -CuO heterostructures is determined by CuO layer and n -ZnO/ p -CuO heterojunction.