

# ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА НА ОСНОВЕ БАРЬЕРА ШОТТКИ $\text{Cu}_2\text{O}-\text{Cu}$

Э.Н. ЗАМАНОВА, Л.А. АЛИЕВА  
Институт Физики АН Азербайджана,  
Баку, 370143, пр. Г. Джавида, 33

В настоящей работе приводятся результаты исследования электрических и фотоэлектрических свойств контакта  $\text{Cu}_2\text{O}-\text{Cu}$  на основе вольт-амперных (ВАХ), вольт-емкостных (ВЕХ) и спектральных характеристик.

Проведен анализ механизмов токопрохождения через барьер Шоттки  $\text{Cu}_2\text{O}-\text{Cu}$ , определены параметры барьера.

## ВВЕДЕНИЕ.

В последние годы интерес к исследованиям классического полупроводника  $\text{Cu}_2\text{O}$  связан с изучением квантовых биений [1], оптического Штарк-эффекта [2], поэтому разработка солнечных элементов (СЭ) [3], высокотемпературных сверхпроводников, в состав которых входит оксид меди [4] и т.д. является актуальной.

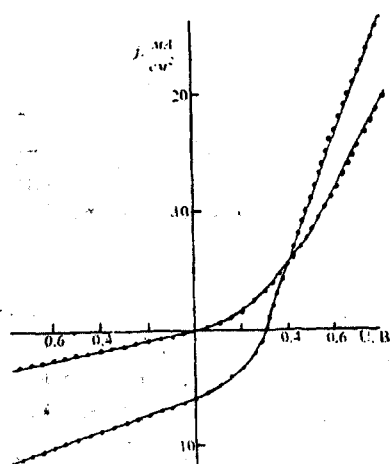


Рис. 1. Темновая и световая ВАХ солнечного элемента  $\text{Cu}_2\text{O}-\text{Cu}$ .

Многими авторами разработаны разные технологические методы получения  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Однако, для достижения оптимальных параметров, как самого полупроводника  $\text{Cu}_2\text{O}$ , так и контакта  $\text{Cu}_2\text{O}-\text{Cu}$ , на котором наблюдаются эффекты, представляющие практический интерес, продолжается поиск путей улучшения и уточнения вышеназванных параметров с целью удешевления технологий [3].

Нами, ранее [5] получены однофазные образцы  $\text{Cu}_2\text{O}$  и подобран режим обработки на воздухе и в вакууме [6]. В данной работе приведены результаты исследований электрических и фотоэлектрических свойств барьера Шоттки  $\text{Cu}_2\text{O}-\text{Cu}$ .

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА.

Элементы  $\text{Cu}_2\text{O}-\text{Cu}$  получены по следующей технологии. Пластика электролитической меди разрезалась на образцы размером  $1\text{см} \times 1\text{см} \times 0,8\text{см}$ . Пластики меди травилась в концентрированной  $\text{HNO}_3$ , промывались в дистиллированной воде и высушивались. Затем эти пластики помещались в кварцевую ампулу, откачанную до  $10^{-4}$

мм.рт.ст. и отжигались при  $1015-1030^\circ\text{C}$  2-3 часа с последующим медленным охлаждением в течении 16 часов. Далее, во избежание реакции с конструкционными материалами печи образцы помещались в кварцевую трубку

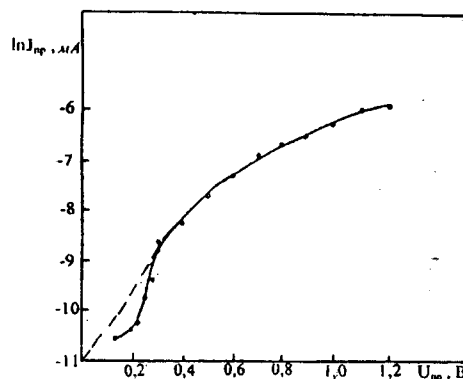


Рис. 2. Зависимость  $\ln J_{\text{пр}} \sim U_{\text{пр}}$  в солнечных элементах  $\text{Cu}_2\text{O}-\text{Cu}$ .

и отжигались на воздухе при  $1030^\circ\text{C}$  в течение 5-10 минут, затем быстро переносились в другую печь, дополнительно отжигались на воздухе при  $540-550^\circ\text{C}$  в течение 5-40 минут и резко охлаждались погружением в дистиллированную воду. Поверхность образцов с одной стороны шлифовалась до меди, а с другой стороны для удаления с поверхности  $\text{Cu}_2\text{O}$  высокоомного слоя  $\text{CuO}$ , затем полировалась до зеркальности. Образцы протравливались в растворе  $8\text{N HNO}_3$  в течении 1-5 сек. На поверхность  $\text{Cu}_2\text{O}-\text{Cu}$  нанесены контакты из  $\text{Ag}$  в виде гребенки.

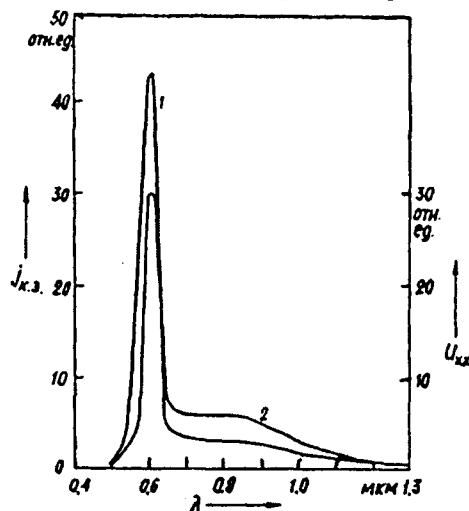


Рис. 3. Спектральная зависимость фототока короткого замыкания и напряжения холостого хода СЭ  $\text{Cu}_2\text{O}-\text{Cu}$

Измерения ВАХ и вольт-емкостных характеристик (ВЕХ) структур  $\text{Cu}_2\text{O-Cu}$  проведены по стандартным методикам. Световые ВАХ сняты при освещении имитатором Солнца мощностью  $\sim 100\text{мВт/см}^2$ . Измерения спектральных характеристик проведены с использованием монохроматора SPM-2. Значение удельного сопротивления определено по ВАХ при нулевых смещениях.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.**

Как известно, контакт  $\text{Cu}_2\text{O}$  и  $\text{Cu}$  образует барьер Шоттки [7]. У тыльнобарьерной структуры образование барьера происходит вместе с получением самого полупроводникового слоя. Поэтому, исследуя барьер, мы одновременно изучали свойства полупроводникового слоя  $\text{Cu}_2\text{O}$ . По значению удельного сопротивления  $\text{Cu}_2\text{O}$   $\rho = 2 \cdot 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  и подвижности дырок  $\mu \sim 72 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{сек}$  [7] были определены значения удельной проводимости  $\sigma \sim 5 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}\cdot\text{см}^{-1}$  и концентрация носителей дырок  $p \sim 4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ .

Согласно [8] плотность состояний в валентной зоне  $N_v$  при комнатной температуре выражается следующей формулой:

$$N_v = 2 \left( \frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (1)$$

где, учитывая  $m_p^* = 0,66 m_0$ , [9] получаем  $N_v = 1,4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$

Зная  $p$  и  $N_v$ , можно определить значение уровня Ферми

$$\Delta E_F = kT \ln \frac{N_v}{p} \approx 0,4 \text{ эВ} \quad (2)$$

На рис. 1 представлены световая и темновая ВАХ солнечного элемента  $\text{Cu}_2\text{O-Cu}$ . Как видно, значения напряжения холостого хода  $U_{x,x} = 0,30 \text{ В}$ , а плотность тока короткого замыкания  $J_{k,z} = 6 \text{ мА/см}^2$ . Значение напряжения отсечки  $U_{отс} \approx 0,30 \text{ В}$ , определенное экстраполяцией к нулю тока выпрямляющей темновой ВАХ хорошо согласуется со значением  $U_{x,x}$ , а это показывает, что переход  $\text{Cu}_2\text{O-Cu}$  представляет собой барьер Шоттки.

Для барьера Шоттки [10] зависимость темнового тока от приложенного напряжения выражается, как

$$J = J_0 \left[ \exp \left( \frac{qU}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (3)$$

где при  $U \geq 3kT/q$  уравнение (3) имеет вид

$$J = J_0 \exp \left( \frac{qU}{nkT} \right) \quad (4)$$

здесь  $n$  – коэффициент неидеальности,  $J_0$  – ток насыщения, который определяется из следующего уравнения:

$$J_0 = AT^2 \exp(-q\phi_B/kT) \quad (5)$$

На рис.2. представлена зависимость  $\ln J_{np}$  от  $U_{np}$ . Экстраполируя прямолинейный участок зависимости  $\ln J_{np}$  от  $U_{np}$ . к нулевому напряжению, определено значение тока насыщения  $J_0 = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ А}$  и по формуле (5), принимая значение постоянной Ричардсона для электронов  $A = 120 \text{ А}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{К}^2$ , вычислено значение высоты барьера  $\phi_B \approx 0,707 \text{ эВ}$ .

На рис. 3 представлены спектральные зависимости фототока короткого замыкания и напряжения холостого хода элемента  $\text{Cu}_2\text{O-Cu}$ . Как видно, в значениях  $J_{k,z}$  и  $U_{x,x}$  наблюдаются резкие изменения в области  $0,61-0,65 \text{ мкм}$ , что соответствует возбуждению носителей при переходе зона-зона ( $\Delta E_g \approx 2,03 \text{ эВ}$ ). Вид спектральной зависимости соответствует типичным характеристикам барьеров Шоттки.

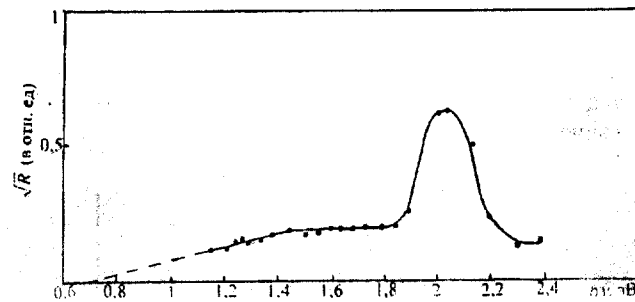


Рис. 4. Зависимость фототоклика  $\sqrt{R}$  от энергии падающего излучения.

Построив зависимость фототоклика ( $\sqrt{R}$ ) от энергии падающего излучения (рис.4) и экстраполируя прямолинейную часть зависимости, согласно теории Фаулера [10], получим значение высоты барьера  $\phi_B \sim 0,7 \text{ эВ}$ , что согласуется со значениями  $\phi_B$ , приведенными в [11].

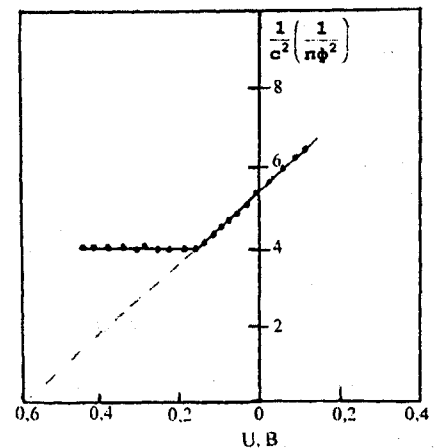


Рис. 5. Зависимость  $\frac{1}{C^2} \left( \frac{1}{\text{пФ}^2} \right)$  от напряжения для СЭ  $\text{Cu}_2\text{O-Cu}$ .

На рис. 5 представлена вольт-емкостная характеристика солнечного элемента  $\text{Cu}_2\text{O-Cu}$ . При значениях  $U = 0,18 \text{ В}$  зависимость  $1/C^2$  от  $U$  является линейной, а в интервале  $0,18 \pm 0,45 \text{ В}$  емкость барьера практически не изменяется, что свидетельствует о наличии поверхност-

ных состояний на границе раздела. Сопоставляя экспериментальные и теоретически рассчитанные в рамках адекватных физических моделей значения высот барьера, можно сказать, что в зависимости от изменения приповерхностного заряда происходит изменение плотности электронных состояний на границе раздела и распределенных по запрещенной зоне. Так, значение высоты барьера, полученное экстраполяцией прямолинейной

зависимости  $\frac{I}{C^2} \sim U$  на ось абсцисс  $\sim 0,6$  эВ занижается на  $0,18$  эВ наличием ловушек на поверхности. Совместный анализ ВАХ и ВЕХ указывает на наличие примесной полосы с шириной  $0,18 \pm 0,3$  эВ на границе раздела [12,13]. По значению тангенса угла наклона линейной части была определена концентрация носителей  $N_p = 1,43 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ . По значению емкости была вычислена толщина области объемного заряда  $d$ , что составляет  $\sim 0,74$  мкм. Значение высоты барьера  $\phi_B$ , определенное из вольт-емкостной характеристики немного превышает значения, определенные по вольтамперным и фотоэлектрическим характеристикам.

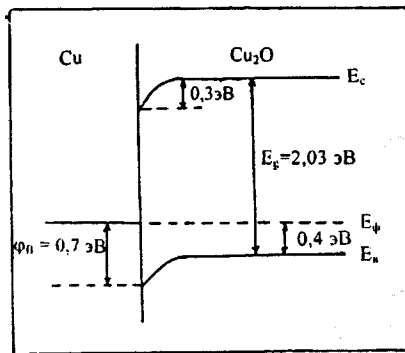


Рис. 6. Зонная диаграмма солнечного элемента  $\text{Cu}_2\text{O}-\text{Cu}$ .

Такое различие между значениями  $U_{x,x} = 0,30$  В и высоты барьера  $0,7$  эВ объясняется тем, что в  $\text{Cu}_2\text{O}$ , полученном высокотемпературным окислением обычно содержатся пустоты, включения и границы зерен [14]. Эти структурные дефекты могут приводить к созданию поверхностных состояний на границе раздела, к большой утечке токов, уменьшению высоты барьера, а также увеличению коэффициента неидеальности в солнечных элементах [13]. Толщина слоя  $\text{Cu}_2\text{O}$ , отношение коэффициентов теплового расширения для Cu и  $\text{Cu}_2\text{O}$  равное  $4,3$  также имеют важное значение [15].

На основе полученных данных построена зонная диаграмма структуры  $\text{Cu}_2\text{O}-\text{Cu}$  (рис.6).

### ВЫВОДЫ:

1. Получены солнечные элементы на основе барьера Шоттки  $\text{Cu}_2\text{O}-\text{Cu}$  методом высокотемпературного окисления на воздухе.
2. Методами вольтамперных, фотоэлектрических и вольт-емкостных характеристик определены высота барьера, толщина области объемного заряда, концентрация носителей, значение уровня Ферми.

На основе полученных данных построена зонная диаграмма.

3. Показано, что СЭ обладают  $J_{k,z} = 6 \text{ мА/см}^2$ ,  $U_{x,x} = 0,30 \text{ В}$ . Область фоточувствительности структуры простирается от  $0,5$  до  $1,3$  мкм.

- [1] А. Бобрышева, М. Шмиглюк, В. Павлов. ФТТ, 1997, т.39, №5.
- [2] А.А. Самохвалов, Т.И. Арбузова, Н.А. Винглик, С.В. Наумов, В.Р. Галахов и др. ФТТ, 1998, т.40, №2, с.295-298.
- [3] А.Е. Rakhshani. Solid State Electronics, 1986, v.29, n.1, p.7-17.
- [4] М.И. Заргарова, Н.М. Мустафаев, С.А. Мехтиева. Н.С. Шустер. Неорганические материалы, 1997, т. 33, №10, с.1235.
- [5] Э.Н. Заманова, А.Г. Абдуллаев, Л.А. Алиева. Деп ВИНТИ, 1987, с.27.
- [6] Э.Н. Заманова, Л.А. Алиева Физика, Баку, 1999, №1, с.23-26.
- [7] I.A. Assimos and D Trivich. J. Appl. Phys, 1973, v.44, n.4, p.1687-1698.
- [8] В.И. Фистуль Введение в физику полупроводников. Москва, 1985, с.332.
- [9] I.W. Hodby, T.E. Jenkins, C. Schwab, H. Tamura, D. Trivich. J. Phys. C. Solid State Phys, 1976, v. 9, n.9, p.1429-1439.
- [10] С.Зи. Физика полупроводниковых приборов, ч.1, Москва, «Мир», 1984, с.435.
- [11] M. Tapiero, C. Nogueta, J.P. Lielingier, C. Schwab, D. Pierrat. Rev. Phys. Appl. 1979, v. 14, n.1, p.231-236.
- [12] Э.Х. Родерик. Контакты металл-полупроводник. Пер. с. англ. Москва. Радио-связь, 1982, с. 208.
- [13] В.Г. Литовченко, В.Г. Попов. Физика поверхности и микроэлектроника. Новое в жизни, науке, технике. Москва, «Знание», 1990, с. 50-53.
- [14] F.L. Weichman and J.M. Reyes. Can. J. Phys., 1980, 58, p.325.
- [15] R.G. Tylecote. Iron Steel. Inst., 1960, 196, p.135.

E.N. Zamanova, L.Ə. Əliyeva

## $\text{Cu}_2\text{O-Cu}$ ŞOTTKI BARYERİ ƏSASINDA GÜNƏŞ ELEMENTLƏRİNİN FOTOELEKTRİK XASSƏLƏRİ

Volt-amper, volt-farad və spektral xassələr əsasında  $\text{Cu}_2\text{O-Cu}$  kontaktının elektrik və fotoelektrik xassələrinin tədqiqinin nəticələri verilmişdir.

Cərəyankeçirmə mexanizmi analiz edilmiş, baryerin parametrləri təyin olunmuşdur.

E.N. Zamanova, L.A. Alieva

## PHOTOELECTRICAL PROPERTIES OF SOLAR CELLS ON THE BASE OF BARRIER SHOTTKY $\text{Cu}_2\text{O-Cu}$

In this papers the results of electrical and photoelectrical properties investigations, that on the base J-V, C-V and spectral characteristic the  $\text{Cu}_2\text{O-Cu}$  contacts are given, as barrier Shottky.

In analyses mechanisms of current conductivity the parameters of barriers are obtained.

*Дата поступления: 09.10.00*

*Редактор: С.И. Мехтиева*