

## ВОЛЬТАМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МОНОКРИСТАЛЛОВ $\text{CuGaTe}_2$

А.А.ИСМАИЛОВ

*Институт Физики НАН Азербайджана  
AZ 1143, г.Баку, пр.Г.Джавид 31*

В настоящей работе исследованы температурные зависимости тока и вольтамперные характеристики (ВАХ) в монокристаллах  $\text{CuGaTe}_2$  в температурном интервале 295÷423К. Из экспериментальных данных определены коэффициент Френкеля, форма потенциальной ямы, связанной с электронной ловушкой, длина свободного пробега электрона, функция потенциальной энергии, зависящая от расстояния до примесного центра, концентрация ловушек, а также глубина залегания моноэнергетических уровней.

$\text{CuGaTe}_2$  относится к соединениям типа  $\text{A}^1\text{B}^3\text{C}_2^6$  со структурой халькопирита. Научный и практический интерес к этим соединениям основан на их применений в качестве преобразователей солнечной энергии в электрическую. Химическим аналогом этого соединения являются соединения типа  $\text{A}^2\text{B}^6$ . Однако их использование в качестве преобразователей энергии не выгодно, так как они не могут конкурировать с монокристаллами соединений  $\text{A}^1\text{B}^3\text{C}_2^6$ . Как показано [1], соединение  $\text{A}^2\text{B}^6$  характеризуется довольно низким значением времени жизни ( $\sim 10^{-11}$  сек.) при высоком значении удельного сопротивления и ширины запрещенной зоны. Из всех соединений  $\text{A}^2\text{B}^6$  с наиболее подходящими параметрами для использования в качестве солнечных элементов является  $\text{CdTe}$ . Однако слабо легированный  $\text{CdTe}$  р-типа даже если он обладал бы приемлемыми значениями времени жизни неосновных носителей, из-за слишком высокого значения удельного сопротивления его нельзя было эффективно использовать в качестве солнечных элементов. Свободными от этих недостатков являются соединения типа  $\text{A}^1\text{B}^3\text{C}_2^6$ , обладающие целым рядом полезных для практического применения свойств. Однако изучение физических свойств этих соединений находится еще в начальной стадии в связи с трудностью получения качественных кристаллов [2].

Объектом исследования являлись монокристаллы  $\text{CuGaTe}_2$ , полученные методом Бриджмена. Были использованы соединения: медь марки ВЗ, галлий марки ОВЧ 13-3, теллур марки В4. Кварцевые ампулы с загрузкой откачивались до остаточного давления  $1.3 \cdot 10^{-3}$  Па, затем ампулы помещали в электропечь, температуру повышали до 1100 К. После выдержки ампулы в течение 2÷3 ч. с использованием вибрации температуру медленно понижали до комнатной. Образующийся слиток перегружали в двойные кварцевые конусообразные ампулы, которые откачивали, запаивали и помещали в вертикальную двухзонную печь для выращивания монокристаллов по методу Бриджмена. Температурный градиент в зоне кристаллизации составлял 20÷30 К/см, а скорость движения ампулы - 0.1÷0.6 мм/ч. Полученные монокристаллы  $\text{CuGaTe}_2$  имели диаметр 10÷12 мм и длину до 50 мм. Для исследований использовались несколько специально отобранных образцов естественного скола  $\text{CuGaTe}_2$  в форме плоскопараллельных пластин со взаимно перпендикулярными направлениями ориентации граней. Образец вырезали вдоль главных кристаллографических направлений [100].

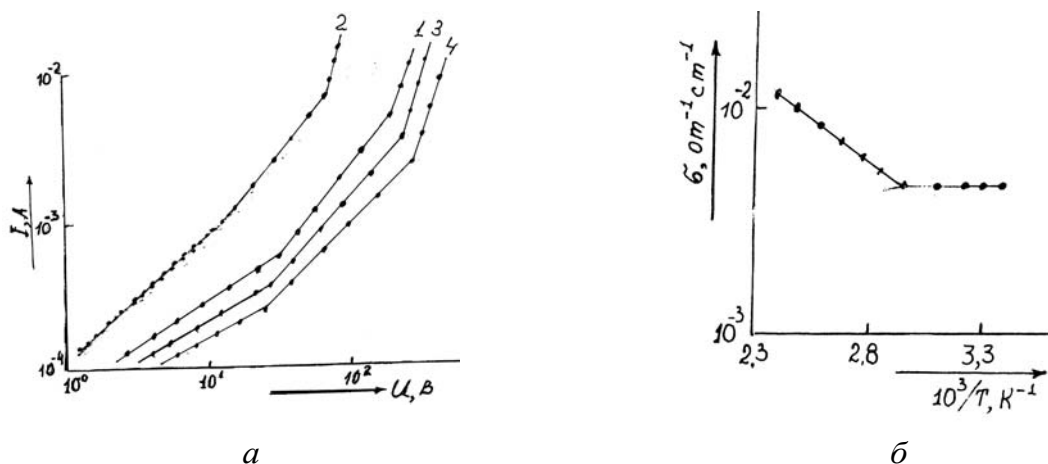
Нижеприведенные измерения соответствуют образцу с линейными размерами  $12 \times 2 \times 1 \text{ мм}^3$ . Перед нанесением электродов соответствующие поверхности образца полировались. В качестве контактов использовался

## ВОЛЬТАМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МОНОКРИСТАЛЛОВ $\text{CuGaTe}_2$

металлический индий. Площадь контактов составляла  $10^{-2} \text{ см}^2$ . Образцы имели вид плоского конденсатора  $\text{In-CuGaTe}_2\text{-In}$ . С целью предотвращения возможности окисления образцов их измерения проводились в вакууме внутри термостатируемой камеры. Температура образца контролировалась медь-константовой термопарой с точностью не хуже  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ . Исследования велись в квазистатическом температурном режиме, при этом скорость измерения температуры составляла  $0.1 \text{ K мин}^{-1}$  [3].

При температуре  $T=300\text{K}$  монокристаллы  $\text{CuGaTe}_2$  имели удельное сопротивление  $\rho = 1.8 \cdot 10^2 \text{ ом-см}$  и обладали р-типом проводимости.

На Рис.1.а. представлены вольтамперные характеристики (ВАХ) структур  $\text{CuGaTe}_2$  при различных температурах. На ВАХ выявляются следующие участки: линейный  $J \sim U$ , квадратичный  $J=U^2$  и область более резкого роста тока  $J \sim U^n$ ,  $n > 3$ .



**Рис.1.**

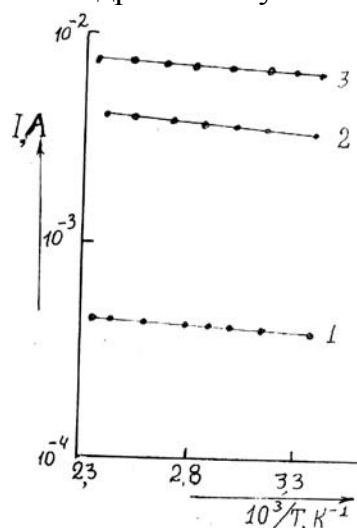
а - темновые ВАХ монокристаллов  $\text{CuGaTe}_2$  при различных температурах  $T, \text{K}$ : 1-295, 2-339, 3-357, 4-423; б- температурная зависимость электропроводности монокристалла  $\text{CuGaTe}_2$ .

Измеренные ВАХ при различных температурах дают возможности определить глубину залегания моноэнергетических уровней, которая связана с напряжением перехода от омического участка к «ловушечному» формулой

$$v^{-1}_{1-2} \approx \exp\left[\frac{(E_1 - E_2)}{kT}\right]. \quad (1)$$

Согласно [4], если значение напряжения перехода от омического участка к квадратичному не зависит от температуры, то в этих кристаллах имеет место слабая компенсация, а если зависит от температуры, то имеет место сильная компенсация. Температурная зависимость напряжения указывает, что монокристаллы  $\text{CuGaTe}_2$  являются сильно компенсированными полупроводниками.

На Рис.1.б показана температурная зависимость электропроводности при напряжении  $U=10\text{В}$ . До температуры  $T=339\text{K}$  электропроводность почти не меняется, а после температуры  $T=339\text{K}$  изменение значительно. По наклону этой зависимости определена энергия активации, значение которой  $E=0.31\text{эВ}$ .

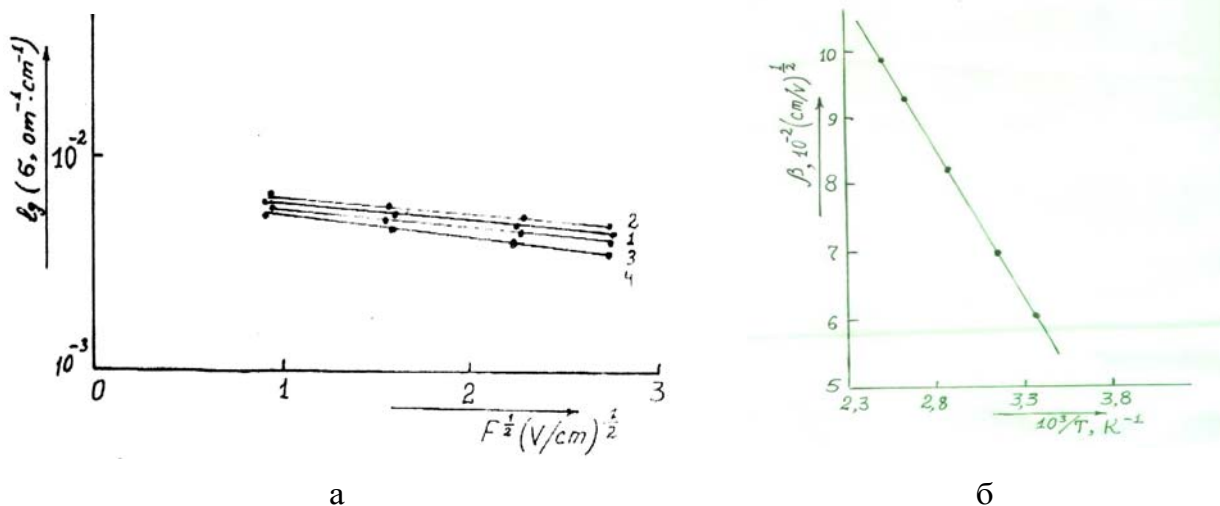


**Рис.2.**

Температурная зависимость тока при различных значениях напряжения  $V, \text{В}$ : 1-5в, 2-50в, 3-100в.

На Рис.2 показана температурная зависимость тока при различных напряжениях. Кривая 1 соответствует омическому участку, кривые 2 и 3 - квадратичному. Из наклона кривых 1, 2, 3 найдена энергия активации  $E_1=0.03\text{эВ}$ ,  $E_2=0.045\text{эВ}$ ,  $E_3=0.03\text{эВ}$ , соответственно.

Таким образом, на основе исследований ВАХ и температурной зависимости тока установлено, что механизм токопрохождения обусловлен током, ограниченным пространственным зарядом. Определены основные параметры локальных уровней. Установлено, что в монокристаллах  $\text{CuGaTe}_2$  имеет место сильная компенсация.



**Рис.3.**

а - Зависимость электропроводности монокристаллов  $\text{CuGaTe}_2$  от напряженности поля  $F$  при температурах  $T, \text{K}$ : 1- 295, 2- 339, 3- 357, 4- 423; б - температурная зависимость коэффициента Френкеля.

На Рис.3.а. представлены зависимости электропроводностей от электрического поля при различных температурах в логарифмических координатах. По наклону этой зависимости определен коэффициент Френкеля. Как известно, согласно теории экспоненциального роста электропроводности, которая впервые была выдвинута Френкелем [5],

$$\sigma \approx \sigma_0 \exp(\beta\sqrt{F}), \tag{3}$$

где  $\beta$ -коэффициент Френкеля

$$\beta = \frac{\sqrt{e^3}}{kT\sqrt{\pi\epsilon\epsilon_0}}, \tag{4}$$

$e$ -заряд электрона,  $\epsilon$  - диэлектрические проницаемость,  $k$  - постоянная Больцмана,  $T$ - абсолютная температура.

Температурная зависимость  $\beta$  представлена на Рис.3.б. Как видно из рисунка, наблюдается рост  $\beta$  с уменьшением температуры, при этом хорошо выполняется зависимость  $\beta \sim 10^3/T$ . Такое температурное изменение  $\beta$  согласуется с теорией Френкеля и экстраполяцией прямой  $\beta \sim 10^3/T$ , что согласно формуле приводит в начало координат. В работе [6] показано, что минимальное значение электрического поля, соответствует нелинейной зависимости  $\sigma=f(E)$ , содержит информацию о концентрации дефектов, ответственных за термополевую ионизацию и проводимость кристаллов  $\text{CuGaTe}_2$ . Согласно выражению

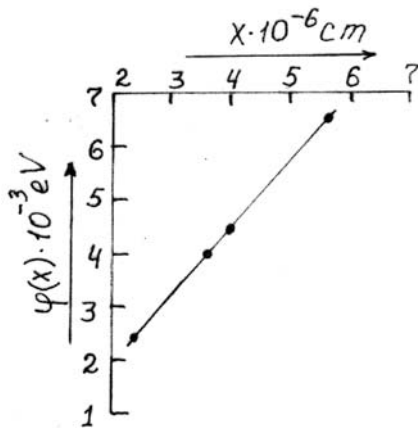
$$N_t = \left( \frac{2e}{kT\beta} \sqrt{E_c} \right)^3, \tag{5}$$

располагая значениями минимального электрического поля  $E_c$ , при котором начинается нелинейная зависимость  $\sigma$  от  $F$ , можно оценить концентрацию ионизованных центров  $N_t$  в  $\text{CuGaTe}_2$ . Получено значение  $N_t=2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Важное значение имеет определение формы потенциальной ямы. Функция  $\varphi(x)$ -потенциальная энергия, зависящая от расстояния до примесного центра или же ловушки ( $x$ -расстояние вдоль направления приложенного поля), под действием электрического поля изменяется и согласно работе [7] равна

$$\varphi_{\zeta}(x) = \frac{kT\beta}{2} \sqrt{F} = eF_x, \quad (6)$$

$$x = \frac{kT\beta}{2e} \frac{1}{\sqrt{F}}. \quad (7)$$

Используя экспериментальные данные, определена глубина потенциальной ямы в монокристаллах  $\text{CuGaTe}_2$ , которая изображена на рис.4. Если известна форма кривой потенциальной энергии для взаимодействия с конкретным центром, то можно получить информацию о структуре центров захвата. Как указывается в работе [7], чтобы электрон покинул центр, должно выполняться условие  $\varepsilon_e > E_0 \Delta U_0$ . Необходимо, чтобы электрон сохранил энергию до того момента, пока он не минует точку перевала и не потеряет ее при тепловых соударениях.



**Рис.4.**

Форма потенциальной ямы связанной с электронной ловушкой в монокристаллах  $\text{CuGaTe}_2$ .

Это имеет место лишь в тех случаях, когда длина свободного пробега электрона больше эффективных размеров потенциальной ямы. При этом длина свободного пробега носителей тока определяется следующей формулой

$$\lambda = \frac{1}{e} f(F_c) = \frac{kT\beta}{2e} \frac{1}{\sqrt{F}}. \quad (8)$$

Длина свободного пробега электрона в монокристаллах  $\text{CuGaTe}_2$ , вычисленная на основе экспериментальных данных согласно(8), приблизительно равна  $2.3 \cdot 10^{-5} \text{ см}$ .

Таким образом, на основе исследований ВАХ и зависимости  $\sigma(T)$  показано, что ток в нелинейной области обусловлен полевым эффектом. Монокристаллы  $\text{CuGaTe}_2$  имеют р-тип проводимости и концентрацию ионизованных центров  $N_t=2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , удельное сопротивление при комнатной температуре  $\rho = 10^2 \text{ омсм}$ .

1. *Физика и химия соединений  $A^2B^6$ , Перевод с английского под редакцией проф. С.А.Медведева, Издательство "Мир", Москва, (1970).*
2. A.A.Isvailov, Sh.G.Gasymov, M.M.Shirinov, *XXX-th annual meeting of the ENPRG, ser.2 (1992) 41.*
3. K.R.Allahverdiev, Sh.G.Gasymov, A.A.Ismailov, Z.Yu.Salaeva, Mikailov, *Phys.stat.solidi (b)*, **211** (1999) 571.
4. А.В.Маловичко, В.Г.Чалая, Е.Т.Шульга, *УФЖ*, **20** (1975) 209.
5. Я.И.Френкель, *ЖЭТФ*, **8** (1938)1292.
6. П.Г.Гилл, *Философия в магазине*, **23** (1971) 59.
7. Н.Г.Волков, В.К.Ляпидевский, *ФТП*, **14** (1972) 1337.

**CuCaTe<sub>2</sub> MONOKRISTALINDA VOLT-AMPER XARAKTERISTIKASI**

**Ə.Ə.İSMAYILOV**

Məqalədə müxtəlif şəraitdə cərəyanın və volt-ampere xarakteristikasının (VAX) temperatur asılılığı tədqiq edilmişdir. Təcrübədən alınan nəticələrlə elektirikkeçiriliyinin temperatur və sahə asılılığı, Frinkel əmsalı, elektron tələsindən asılı olan potensial çuxurun forması, elektronun sərbəst yolunun uzunluğu, aşqar mərkəzlərə qədər potensial enerji funksiyası, lovuşkanın konsentrasiyası həmçinin monoenergetik səviyyənin dərinliyi təyin edilmişdir.

**VOLT-AMPERE CHARACTERISTICS MONOCRYSTALS OF CuGaTe<sub>2</sub>**

**A.A.ISMAILOV**

Temperature dependences of conductivity and volt-ampere characteristics (VAH) of single crystals of CuCaTe<sub>2</sub> at temperature range 295÷423K have been presented. Frenkels coefficients, the potential well and the free length of electrons, the function of potential energy have been determined from experimental data.

Редактор: Дж.Абдинов