

## ДОЛГОВРЕМЕННАЯ РЕЛАКСАЦИЯ ТОКА В МОНОКРИСТАЛЛЕ $TlGaS_2$

С.Н. МУСТАФАЕВА, А.А. ИСМАИЛОВ

*Институт физики НАН Азербайджана  
AZ 1143, Баку, пр. Г.Джавида, 33*

Результаты изучения токов изотермической релаксации, вольт-амперных характеристик при различных температурах, термостимулированных токов позволили выявить в монокристалле  $TlGaS_2$  два ловушечных уровня с энергиями активации  $E_{t1}=0.14\pm 0.16$ эВ и  $E_{t2}=0.32$ эВ. Показано, что за долговременной спад тока в  $TlGaS_2$  ответственен ловушечный уровень  $E_{t1}=0.14$ эВ.

Монокристаллы  $TlGaS_2$  относятся к классу слоистых широкозонных полупроводников (максимум собственного фототока приходится на 2.72эВ при 300К) с высоким электрическим сопротивлением [1]. Сильное влияние на электрические и фотоэлектрические свойства этих кристаллов оказывают энергетические уровни в запрещенной зоне, обусловленные структурными дефектами. Наличие локальных состояний приводит к различным временным изменениям тока, протекающего через кристалл.

Целью настоящей работы явилось изучение релаксационных токов в монокристалле  $TlGaS_2$ , сведения о которых в литературе отсутствуют.

Образцы из монокристаллов  $TlGaS_2$  [1] были изготовлены в сэндвич-варианте, так что электрическое поле к ним прикладывалось вдоль кристаллографической оси С, т.е. поперек естественных слоев монокристаллов. В качестве контактного материала к кристаллам  $TlGaS_2$  использована серебряная паста. Толщина монокристаллов была  $\sim 300$ мкм, а подконтактная площадь составляла  $2\cdot 10^{-2}$ см<sup>2</sup>. Удельное темновое сопротивление изготовленных из  $TlGaS_2$  образцов составляло  $\rho=2\cdot 10^9$ Ом·см при 293К.

При изучении процессов переноса заряда было обнаружено, что при приложении к образцу  $Ag-TlGaS_2-Ag$  постоянного электрического напряжения темновой ток, протекающий в нем, изменялся во времени. Характер изменения тока зависел от величины приложенного напряжения. Серебро, как известно, является быстродиффундирующей примесью в полупроводниках, поэтому при приложении постоянного электрического поля к структуре  $Ag-TlGaS_2-Ag$  могла иметь место электродиффузия  $Ag$  в  $TlGaS_2$  и соответствующие необратимые изменения свойств  $TlGaS_2$ . Однако полученные нами экспериментальные результаты указывают на то, что электродиффузия контактного материала не оказывает существенного влияния на релаксационные характеристики структуры  $Ag-TlGaS_2-Ag$ .

На Рис.1(а) показаны экспериментальные зависимости тока, протекающего через образец  $Ag-TlGaS_2-Ag$ , от времени при различных приложенных электрических напряжениях. Как видно из Рис.1(а), при всех напряжениях имела место спадающая релаксация тока, и примерно через 6 минут устанавливался стационарный уровень тока. При увеличении напряжения спад тока со временем становился более пологим (кривые 1 – 4).

Вследствие того, что величина тока зависела от времени выдержки напряжения, вольтамперные характеристики (ВАХ) изученных образцов из  $TlGaS_2$  обнаруживали гистерезис, т.е. прямая и обратная ветви ВАХ не совпадали; прямая ветвь снималась при повышении напряжения, а обратная ветвь – при понижении напряжения. На Рис.2 приведены ВАХ образца  $Ag-TlGaS_2-Ag$ , снятые по

установившимся значениям тока, при различных температурах в интервале 293÷393К. ВАХ при температурах 293, 320 и 350К (кривые 1-3) характеризовались коротким сублинейным участком  $I \sim V^{0.5}$ , переходящим в участок  $I \sim V^{1.2 \div 1.3}$ . При 293К после участка  $I \sim V^{1.2}$  имел место крутой рост тока  $I \sim V^4$ . При высоких температурах 373 и 393К ВАХ характеризовались одним наклоном  $I \sim V^{1.5}$  во всей изученной области электрических напряжений (кривые 4 и 5). Спадающая релаксация тока в монокристаллах TlGaS<sub>2</sub> приводила к меньшей степени зависимости тока от напряжения.

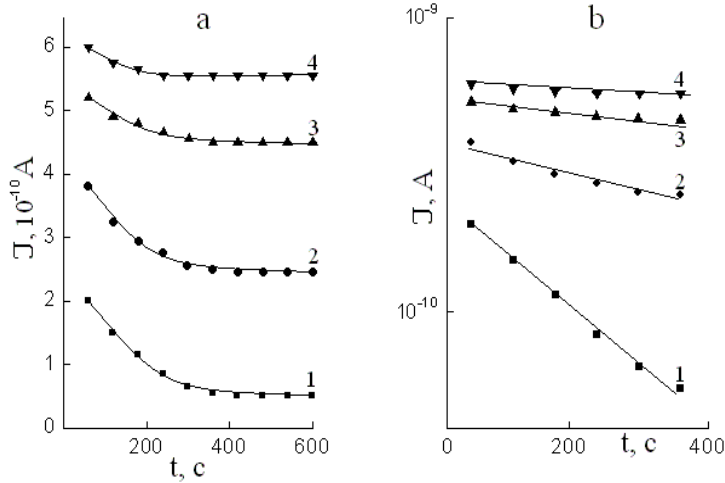


Рис. 1.

Временные изменения тока, протекающего через систему Ag-TlGaS<sub>2</sub>-Ag при различных значениях приложенного электрического напряжения V(В): 1 – 0.1; 2 – 0.5; 3 – 0.9; 4 – 1.2; а – в обычных координатах; б – в полулогарифмическом масштабе; T=293К.

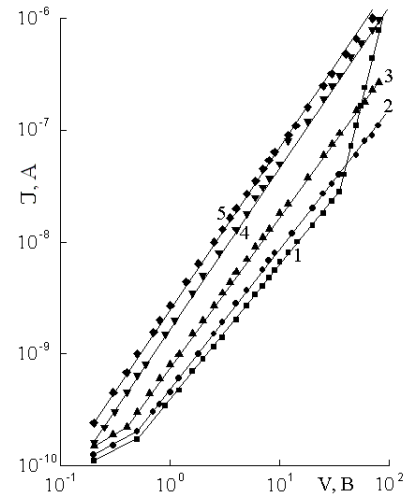


Рис. 2.

ВАХ образца Ag-TlGaS<sub>2</sub>-Ag при различных температурах T, К: 1 – 293; 2 – 320; 3 – 350; 4 – 373; 5 – 393.

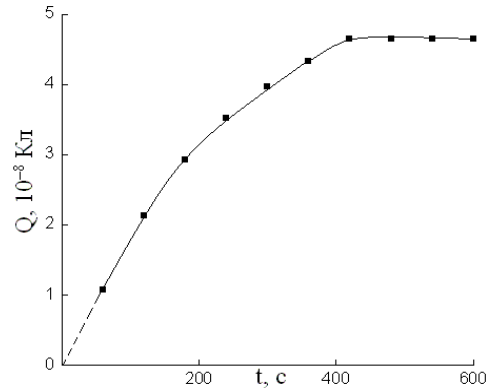
Спад тока со временем можно объяснить тем, что в образце, по которому течет ток, аккумулируется заряд, частично компенсирующий величину приложенного внешнего напряжения. На Рис.3 приведена экспериментальная зависимость накопленного в системе Ag-TlGaS<sub>2</sub>-Ag заряда Q от времени выдержки напряжения V=0.1В при 293К. Со временем величина заряда нарастала и где-то через 6–7 минут выходила на насыщение. Максимальная величина накопленного в образце Ag-TlGaS<sub>2</sub>-Ag заряда составляла  $4.8 \cdot 10^{-8}$  Кл, что соответствовало максимальной плотности заряда  $Q_{max} = 2.4 \cdot 10^{-6}$  Кл/см<sup>2</sup>.

Приведенные на Рис.1(а) спадающие ветви релаксационных кривых  $I(t)$  перестроены в полулогарифмическом масштабе и показаны на Рис.1(б). Как видно из этого рисунка, экспериментальные данные в координатах  $lg I$  от  $t$  спрямлялись. Это находилось в согласии с формулой для спадающих  $I - t$  характеристик

$$I(t) = \frac{q \mu \tau n_t S F}{\tau_d} \exp\left(-\frac{t}{\tau_d}\right), \quad (1)$$

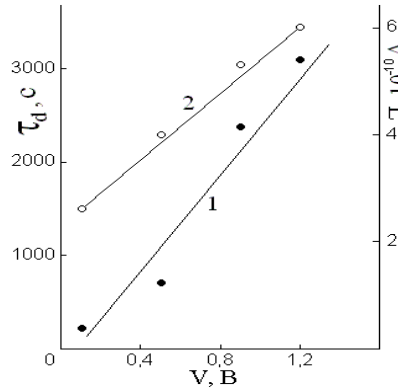
полученной в [2] на основе простой кинетической модели, предполагающей наличие в кристалле дискретных ловушечных уровней при условии, что процессами перезахвата носителей заряда можно пренебречь. В формуле (1)  $q$  – заряд электрона;  $\mu$  – дрейфовая подвижность носителей заряда;  $\tau$  – время жизни носителей заряда;  $n_t$  – плотность носителей на ловушках;  $S$  – подконтактная площадь;  $F$  – напряженность приложенного электрического поля. Согласно (1) ток спадает экспоненциально со временем с временной постоянной  $\tau_d$ . По наклонам

прямых  $\lg I$  от  $t$ , показанных на Рис.1(б), определены временные постоянные  $\tau_d$  для различных напряжений.



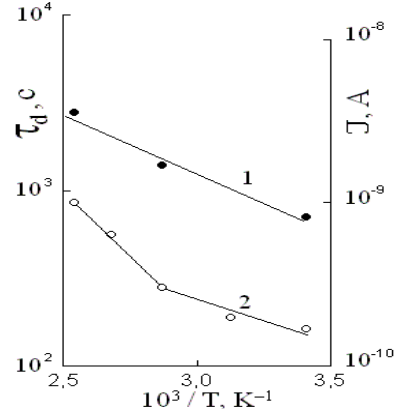
**Рис. 3.**

Зависимость накопленного в системе Ag-TlGaS<sub>2</sub>-Ag заряда от времени выдержки напряжения V=0.1В при 293К.



**Рис.4.**

Зависимости постоянной времени  $\tau_d$  спада темнового тока (кривая 1) и тока отсечки  $I_0$  (кривая 2) от величины приложенного к системе Ag-TlGaS<sub>2</sub>-Ag электрического напряжения при 293К.



**Рис.5.**

Температурные зависимости  $\tau_d$  (кривая 1) и темнового тока  $I$  (кривая 2) в монокристалле TlGaS<sub>2</sub> при V=0.5В.

График зависимости  $\tau_d(V)$  показан на Рис.4 (кривая 1), откуда следует, что  $\tau_d$  линейно растет с ростом напряжения. Токи отсечки ( $I_0$ ), определенные экстраполяцией прямых  $\lg I(t)$  на рис. 1, б до пересечения с осью ординат, графически представлены на рис. 4 (кривая 2) в зависимости от напряжения. С ростом напряжения  $I_0$  линейно возрастал. Этот экспериментальный факт находится в согласии с формулой (1), из которой следует, что при  $t=0$

$$I_0 = \frac{q \mu \tau n_i S F}{\tau_d} \quad (2)$$

Нами также изучена температурная зависимость постоянной времени  $\tau_d$ , описывающей релаксацию темнового тока в системе Ag-TlGaS<sub>2</sub>-Ag (Рис.5, кривая 1). Как видно из Рис.5, экспериментальные результаты подчинялись закономерности

$$\tau_d = \exp\left(-\frac{E_t}{kT}\right) \quad (3)$$

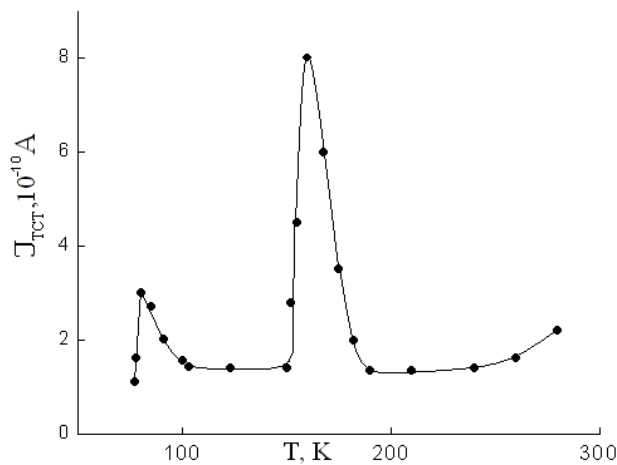
Наклон полученной экспоненциальной зависимости  $\lg \tau_d$  от  $10^3/T$  составлял  $E_t=0.14$ эВ. Это свидетельствует о том, что долговременная релаксация тока в образце TlGaS<sub>2</sub> обусловлена захватом носителей заряда ловушечным уровнем  $E_t=0.14$ эВ.

Из температурной зависимости темнового тока в системе Ag-TlGaS<sub>2</sub>-Ag (Рис.5, кривая 2) выявлены два уровня с энергиями 0.10 и 0.32эВ.

Для выявления имеющихся локальных уровней в монокристалле TlGaS<sub>2</sub> нами также изучены термостимулированные токи (ТСТ). На Рис.6 показан спектр ТСТ в монокристалле TlGaS<sub>2</sub>, снятый при скорости нагрева  $\beta=0.34$ К/с. На спектре ТСТ четко выявляются два пика при температурах  $T_{m1}=80$  и  $T_{m2}=160$ К. Эти пики ТСТ соответствуют глубине ловушек 0.16 и 0.32эВ, оцененных из выражения [3]:

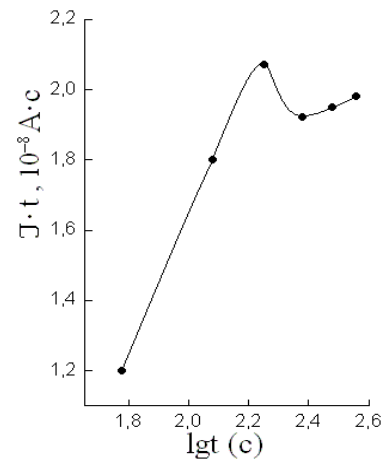
$$E_t = 23kT_m, \quad (4)$$

т.е. полученные из температурных зависимостей тока и постоянной времени спада тока, а также из спектра ТСТ значения глубины залегания ловушек в монокристалле TlGaS<sub>2</sub>  $E_{t1}=0.14\div 0.16$ эВ,  $E_{t2}=0.32$ эВ хорошо согласуются друг с другом.



**Рис.6.**

Кривая ТСТ в TlGaS<sub>2</sub> при  $\beta=0.34$ К/с.



**Рис.7.**

$I-t-lgt$  характеристика для TlGaS<sub>2</sub>.  $V=0.1$ В;  $T=293$ К.

Согласно теории изотермических токов в полупроводниках с ловушками [4] график зависимости  $I \cdot t$  от  $\ln t$  имеет максимум при  $t = \tau_d$ . Из формулы (1) следует, что при этом

$$(I \cdot t)_{\max} = q \mu \tau S F e^{-1} n_t. \quad (5)$$

Такая зависимость для монокристалла TlGaS<sub>2</sub> представлена на Рис.7 при  $T=293$ К. Спад тока осуществлялся при напряжении 0.1В. Как видно из Рис.7 кривая  $I \cdot t$  от  $\ln t$  имела максимум при  $t=180$ с, т.е. из данного графика определена постоянная времени спада тока  $\tau_d=180$ с, величина которой удовлетворительно согласуется со значением  $\tau_d=217$ с, полученным из наклона зависимости  $I(t)$  в TlGaS<sub>2</sub> при  $V=0.1$ В и 293К (Рис.1(b), кривая 1).

Таким образом, анализ экспериментальных результатов показал, что за долговременной спад тока в TlGaS<sub>2</sub> ответственен ловушечный уровень  $E_t=0.14$ эВ.

1. С.Н. Мустафаева, *ФТТ*, **47** (2005) 1937.
2. G. Micocci, A. Rizzo, A. Terore, F. Zuanni, *Phys. Stat. Sol. (a)*, **80** (1989) 263.
3. А. Милнс, *Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках*, Мир, Москва, (1977).
4. J.G. Simmons, M.C. Tam, *Phys. Rev. B*, **7** (1973) 3706.

**TlGaS<sub>2</sub> MONOKRISTALINDA CƏRƏYANIN UZUNMÜDDƏTLI RELAKSASIYASI**  
**S.N.MUSTAFAYEVA, Ə.Ə.İSMAYILOV**

TlGaS<sub>2</sub> monokristalında izotermik relaksasiya cərəyanının, volt-ampere xarakteristikalarının müxtəlif temperaturalarda və termostimulə edilmiş cərəyan tədqiqinin nəticələri əsasında, bu monokristalda yükdaşıyıcıların tutulmasını təmin edən aktivləşmə enerjiləri  $E_{t1}=0.14-0.16$ eV və  $E_{t2}=0.32$ eV olan iki energetik səviyyənin mövcudluğu müəyyən edilmişdir. Tapılmışdır ki, TlGaS<sub>2</sub> monokristalında cərəyanın uzunmüddətli azalması, enerjisi  $E_{t1}=0.14$ eV olan tutulma səviyyəsi vasitəsi ilə baş verir.

**LONG-TIME RELAXATION OF CURRENT IN TlGaS<sub>2</sub> SINGLE CRYSTAL**  
**S.N. MUSTAFAEVA, A.A. ISMAILOV**

The results of investigation of isothermal relaxation currents, volt-ampere characteristics at various temperatures and thermally stimulated currents allowed to reveal the presence of two trapping centers with activation energies  $E_{t1}=0.14\div 0.16$ eV and  $E_{t2}=0.32$ eV in TlGaS<sub>2</sub> single crystal. It was shown that trap level  $E_{t1}=0.14$ eV is responsible for long-time relaxation of current in TlGaS<sub>2</sub> single crystal.

Редактор: А.Гарибов