

**ПРЫЖКОВАЯ ПРОВОДИМОСТЬ В СЛОИСТЫХ
МОНОКРИСТАЛЛАХ $TiGa_{0.99}Fe_{0.01}Se_2$**

С.Н.МУСТАФАЕВА, А.И.ГАСАНОВ, Э.М.КЕРИМОВА, Р.Н.КЕРИМОВ

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

Установлено, что при температурах $T < 250K$ в слоистых монокристаллах $TiGa_{0.99}Fe_{0.01}Se_2$ поперек естественных слоев в постоянном электрическом поле имеет место прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка по локализованным вблизи уровня Ферми состояниям. Оценены плотность состояний в окрестности уровня Ферми: $N_F = 5.6 \cdot 10^{17} \text{эВ}^{-1} \text{см}^{-3}$, их разброс $\Delta E = 0.13 \text{эВ}$, среднее расстояние прыжков $R = 184 \text{Å}$ и концентрация глубоких ловушек $N_t = 7.3 \cdot 10^{16} \text{см}^{-3}$. В области температур $81 \div 150K$ в монокристаллах $TiGa_{0.99}Fe_{0.01}Se_2$ имела место безактивационная прыжковая проводимость.

Монокристаллы $TiGaSe_2$ являются типичными представителями слоистых полупроводников. Для слоистых кристаллов характерно наличие таких структурных дефектов, как вакансии и дислокации, а это в свою очередь, приводит к высокой плотности состояний, локализованных вблизи уровня Ферми. Локализованные в запрещенной зоне состояния ответственны за большинство электронных процессов, протекающих в полупроводниках. По этим локализованным состояниям осуществляется перенос заряда, как при постоянном, так и при переменном токе.

В [1] было экспериментально установлено, что при температурах $T \leq 200K$ в монокристаллах $TiGaSe_2$ как вдоль, так и поперек их естественных слоев в постоянном электрическом поле имеет место прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка по локализованным вблизи уровня Ферми состояниям. Оценена плотность состояний в окрестности уровня Ферми (N_F). Значения N_F , вычисленные из экспериментальных результатов измерения проводимости монокристаллов $TiGaSe_2$ вдоль и поперек слоев составляли $1.3 \cdot 10^{19}$ и $2 \cdot 10^{18} \text{эВ}^{-1} \text{см}^{-3}$. Значение N_F , вычисленное из результатов измерения проводимости $TiGaSe_2$ на переменном токе [2], составляло $5.4 \cdot 10^{19} \text{эВ}^{-1} \text{см}^{-3}$.

Изучена также прыжковая проводимость в поликристаллах $TiFeSe_2$ [3] на постоянном токе. В $TiFeSe_2$ для N_F было получено значение $3.3 \cdot 10^{18} \text{эВ}^{-1} \text{см}^{-3}$. Представлялось интересным изучение влияния частичного замещения галлия в $TiGaSe_2$ железом на их электрические свойства, что и явилось целью настоящей работы.

Образцы состава $TiGa_{0.99}Fe_{0.01}Se_2$ были синтезированы сплавлением исходных высокочистых (не менее 99.99) компонентов в вакуумированных до 10^{-3}Па кварцевых ампулах, а их монокристаллы были выращены методом Бриджмена-Стокбаргера. Образцы из $TiGa_{0.99}Fe_{0.01}Se_2$ для электрических измерений были получены скалыванием по плоскости естественного скола от массивных монокристаллов и имели толщину порядка 100мкм . Омические контакты к образцам создавали вплавлением индия. Образцы были изготовлены в сэндвич-варианте так, что постоянное электрическое поле прикладывалось вдоль C -оси монокристаллов. Электрическая проводимость (σ) полученных образцов измерена в температурном диапазоне $81 \div 300K$. Напряженность приложенного постоянного электрического поля соответствовала омическому участку вольт-амперной характеристики. В процессе измерений образцы помещались в экранированный вакуумный криостат с системой стабилизации температуры (точность стабилизации составляла $0.02K$).

На Рис.1 представлена температурная зависимость проводимости монокристалла $TiGa_{0.99}Fe_{0.01}Se_2$. На зависимости $\lg\sigma$ от $10^3/T$ наблюдается длинный экспоненциальный участок с наклоном 0.58эВ в области температур $250\div 300\text{К}$. При уменьшении температуры ниже 250К энергия активации проводимости не имела постоянного наклона, т.е. непрерывно уменьшалась с уменьшением температуры вплоть до 150К . Эти значения проводимости перестроены в координатах $\lg\sigma$ от $T^{-1/4}$ и представлены на рисунке. Наклон этой прямой составлял $T_0=8.5\cdot 10^6\text{К}$.

Проводимость подобного типа, когда энергия активации монотонно уменьшается с температурой, осуществляется прыжками носителей заряда по состояниям, локализованным вблизи уровня Ферми [4]:

$$\sigma \sim \exp[-(T_0/T)^{1/4}], \tag{1}$$

где
$$T_0 = \frac{16}{N_F \cdot ka^3}, \tag{2}$$

k -постоянная Больцмана, a -радиус локализации. Из формулы (2) мы оценили плотность локализованных состояний вблизи уровня Ферми в монокристаллах $TiGa_{0.99}Fe_{0.01}Se_2$:

$N_F=5.6\cdot 10^{17}\text{эВ}^{-1}\text{см}^{-3}$. При оценке N_F для радиуса локализации взято значение $a=34\text{Å}$, которое было получено экспериментально в [5] для монокристалла $GaSe$.

Также были оценены расстояния прыжков R носителей заряда при различных температурах:

$$R = \frac{3}{8}aT_0^{1/4}T^{-1/4} \tag{3}$$

При $T=150\text{К}$ $R=196\text{Å}$, а при $T=250\text{К}$ $R=173\text{Å}$, так что среднее расстояние прыжков в $TiGa_{0.99}Fe_{0.01}Se_2$ в области температур $150\div 250\text{К}$ составляло $R_{cp}=184\text{Å}$. R_{cp} в ~ 5 раз превышало среднее расстояние между центрами локализации носителей заряда, т.е. $R_{cp}/a\approx 5$.

Зная N_F и R из условия [4]:

$$\frac{4\pi}{3}R^3N_F \cdot \frac{\Delta E}{2} = 1, \tag{4}$$

мы оценили разброс ловушечных состояний вблизи уровня Ферми: $\Delta E=0.13\text{эВ}$.

По формуле:

$$N_t = N_F \cdot \Delta E \tag{5}$$

можно определить концентрацию глубоких ловушек в $TiGa_{0.99}Fe_{0.01}Se_2$: $N_t=7.3\cdot 10^{16}\text{см}^{-3}$.

Таким образом, в температурной области $150\div 250\text{К}$ в монокристаллах $TiGa_{0.99}Fe_{0.01}Se_2$ имеет место прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка. В

области температур $81\div 150\text{К}$ проводимость не зависела от температуры (рисунок). Независимость σ от температуры характерна для безактивационной прыжковой проводимости, когда прыжки из одного локализованного состояния в другое осуществляются без поглощения фононов [6].

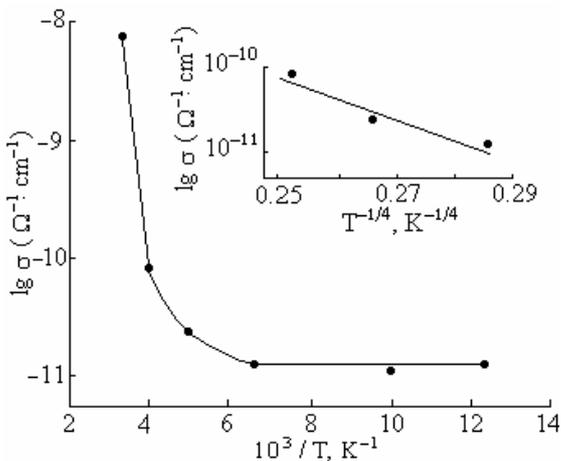


Рис.1.

Температурная зависимость проводимости монокристалла $TiGa_{0.99}Fe_{0.01}Se_2$ вдоль C -оси в координатах Аррениуса и Мотта.

Полученные для $TiGa_{0.99}Fe_{0.01}Se_2$ экспериментальные результаты сведены в Таблице 1, в которой приведены для сравнения также данные для $TiGaSe_2$.

Таблица 1.

Параметры монокристаллов $TiGaSe_2$ и $TiGa_{0.99}Fe_{0.01}Se_2$, полученные из измерений проводимости вдоль C-оси.

монокристалл	ρ , ом·см (T=298R)	T, K	N_F , эВ ⁻¹ см ⁻³	R_{cp} , Å	R_{cp}/a	E, эВ	N_t , см ⁻³
$TiGaSe_2$	$6.5 \cdot 10^7$	$3.4 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^{18}$	133	4	0.10	$2 \cdot 10^{17}$
$TiGa_{0.99}Fe_{0.01}Se_2$	$1.3 \cdot 10^8$	$8.5 \cdot 10^6$	$5.6 \cdot 10^{17}$	184	5	0.13	$7.3 \cdot 10^{16}$

1. С.Н.Мустафаева, В.А.Алиев, М.М.Асадов, *ФТТ*, **40** (1998) 48.
2. С.Н.Мустафаева, С.Д.Мамедбейли, И.А.Мамедбейли, *Неорган. материалы*, **30** (1994) 626.
3. С.Н.Мустафаева, Э.М.Керимова, А.И.Джаббарлы, *ФТТ* **42** (2000) 2132.
4. Н.Мотт, Э.Дэвис, *Электронные процессы в некристаллических веществах. Мир, М.*, (1974).
5. С.Н.Мустафаева, *Неорган. материалы*, **30** (1994) 619.
6. Б.И.Шкловский, *ФТП*, **6** (1972) 2335.

LAYLI $TiGa_{0.99}Fe_{0.01}Se_2$ MONOKRISTALINDA HOPPANMA TIPLI KEÇIRICILİK

S.N.MUSTAFAEVA, A.I.HƏSƏNOV, E.M.KƏRIMOVA, R.N.KƏRİMOV

Sabit elektrik sahəsində $T < 250K$ temperaturlarında laylı $TiGa_{0.99}Fe_{0.01}Se_2$ monokristalda layların eni istiqamətində hoppanma tipli keçiricilik müəyyən edilmişdir. Bu tip keçiricilik Fermi səviyyəsinin yaxınlığında lokalizə olunmuş enerji səviyyələrində hoppanmaların uzunluğunun dəyişməsi ilə baş verir. Fermi səviyyəsinin yaxınlığındakı enerji hallarının sıxlığı $N_F = 5.6 \cdot 10^{17} eV^{-1} cm^{-3}$, onların paylanması $\Delta E = 0.13 eV$, hoppanmaların orta məsafəsi $R = 184 \text{Å}$ və dərin tutucularının qatılığı $N_t = 7.3 \cdot 10^{16} cm^{-3}$ hesablanmışdır.

Laylı $TiGa_{0.99}Fe_{0.01}Se_2$ monokristalı $81 \div 150K$ temperatur intervalında aktivləşməmiş hoppanma tipli keçiriciliyə malik olur.

HOPPING CONDUCTIVITY IN LAYER $TiGa_{0.99}Fe_{0.01}Se_2$ SINGLE CRYSTALS

S.N. MYSTAFAEVA, A.I. GASANOV, E.M. KERIMOVA, R.N. KERIMOV

It was established that dc-hopping conductivity on localized states near the Fermi level takes place in $TiGa_{0.99}Fe_{0.01}Se_2$ single crystals along C-axis at $T < 250 K$. Density of localized states near the Fermi level $N_F = 5.6 \cdot 10^{17} eV^{-1} cm^{-3}$; average hopping distance $R = 184 \text{Å}$; concentration of deep centers $N_t = 7.3 \cdot 10^{16} cm^{-3}$ were calculated. Non-activated hopping conductivity in $TiGa_{0.99}Fe_{0.01}Se_2$ single crystals takes place at $81 \div 150K$ temperature range.

Редактор: М.Алиев