

В слоистых монокристаллах $TiGaSe_2$ изучены температурные зависимости проводимости вдоль и поперек слоев в широкой области температур от 10 до 293 К. Показано, что в области низких температур в монокристаллах $TiGaSe_2$ как вдоль, так и поперек слоев имеет место прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка по локализованным состояниям вблизи уровня Ферми. Определены плотность состояний вблизи уровня Ферми $N_F=1,3 \cdot 10^{19} \text{ эВ}^{-1} \text{ см}^{-3}$, разброс по энергии этих состояний $J=0,011 \text{ эВ}$, расстояния прыжков при различных температурах. Так например, вдоль слоев кристаллов $TiGaSe_2$ расстояния прыжков R с уменьшением температуры от 30 до 10 К увеличивались от 130 до 170 Å.

К настоящему времени многие физические свойства слоистых монокристаллов $TiGaSe_2$ и процессы переноса заряда в них достаточно подробно изучены [1-3]. Однако, как показал проведенный нами анализ опубликованных работ, основное внимание авторы уделяли процессам переноса заряда по разрешенной зоне этих полупроводников, считая, что основной вклад в проводимость вносят носители, переходящие из одной разрешенной зоны в другую или из примесных состояний в одну из разрешенных зон. Достаточно высокая концентрация локализованных состояний в запрещенной зоне (порядка $10^{19} \text{ эВ}^{-1} \text{ см}^{-3}$) [4,5] приближает эти кристаллы по энергетической структуре к аморфным полупроводникам. Одним из возможных механизмов переноса заряда в аморфных и компенсированных полупроводниках являются термически активированные перескоки. При этом носители заряда перескакивают от одного центра, локализованного в запрещенной зоне, к другому с испусканием или поглощением фонона. Обычно прыжковую проводимость наблюдают при низких температурах, когда она доминирует над проводимостью термовозбужденных носителей заряда в разрешенной зоне.

В настоящей работе приведены результаты изучения процессов переноса заряда в слоистых монокристаллах $TiGaSe_2$ в постоянном электрическом поле и при низких температурах. Проводимость образцов определяли как вдоль (σ_{lc}), так и поперек (σ_{lc}) слоев кристаллов. В качестве контактного материала был использован индий, который вплавлялся в кристаллы и создавал омический контакт с $TiGaSe_2$. Образцы для измерений имели толщину порядка 100-130 мкм. Амплитуда приложенного к кристаллу постоянного электрического поля соответствовала омической области вольт-амперной характеристики.

Проводимость образцов $TiGaSe_2$ была измерена в области температур 10-293 К. Образцы устанавливались в гелиевом криостате марки "УТРЕКС" с системой стабилизации температуры (точность стабилизации 0,02 К).

Измерения проводились в направлении охлаждения кристалла, что исключало влияние термического опустошения локальных уровней.

На рис. 1 приведена температурная зависимость электропроводности монокристаллов $TiGaSe_2$ вдоль слоев (σ_{lc}) в температурном диапазоне 10-232 К. С понижением температуры от 232 до 150 К σ_{lc} экспоненциально уменьшалась. В этой области температур основной вклад в проводимость вносят носители заряда, активированные с мелкого примесного уровня $E_t=0,04 \text{ эВ}$. С дальнейшим понижением температуры проводимость увеличивалась и при $T=104 \text{ К}$ достигала максимального значения.

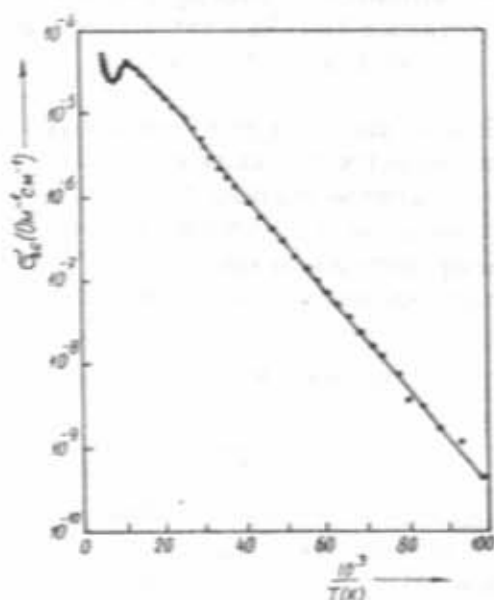


Рис. 1. Температурная зависимость проводимости вдоль слоев монокристаллов $TiGaSe_2$.

Аномальный ход σ_{lc} в этой области температур обусловлен, по-видимому, фазовым переходом, наличие которого установлено также и из измерений теплоемкости и оптических свойств монокристаллов $TiGaSe_2$ в области температур 100-120 К [6]. При $T < 104 \text{ К}$ σ_{lc} вновь уменьшалась по мере понижения температуры с переменной энергией активации. Эксперименталь-

ные точки в области низких температур (10-30 К) плохо укладывались на одну прямую в координатах $\lg \sigma_{1c}$ от $10^3/T$ (рис.1). Примерное значение энергии активации проводимости в этой области температур составляло $\sim 0,01$ эВ. Однако, эти точки хорошо спрямлялись в координатах $\lg \sigma_{1c}$ от $T^{-1/4}$ (рис.2). Указанный экспериментальный факт свидетельствует о том, что в

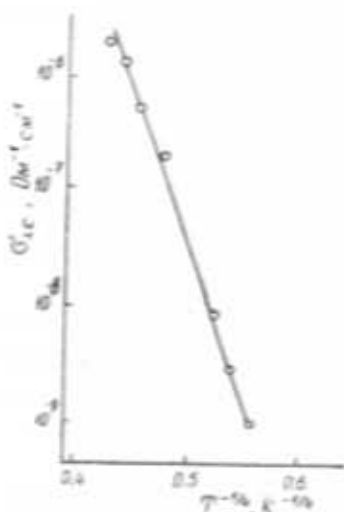


Рис.2. Низкотемпературная проводимость монокристаллов TiGaSe_2 вдоль их слоев в координатах Мотта.

данной области температур в монокристаллах TiGaSe_2 наблюдается прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка по локализованным состояниям вблизи уровня Ферми. При таком типе проводимости зависимость $\lg \sigma = f(T^{-1/4})$ должна представлять собой прямую с наклоном T_0 [7]:

$$\sigma \sim \exp \left[-(T_0 / T)^{1/4} \right] \quad (1)$$

$$T_0 = \frac{16}{N_F \cdot k \cdot a^3} \quad (2)$$

где N_F - плотность состояний вблизи уровня Ферми, k - постоянная Больцмана, a - радиус локализации. Из рис. 2 определено значение $T_0 = 5,4 \cdot 10^5$ К. Зная T_0 , по формуле (2) определили плотность локализованных состояний вблизи уровня Ферми. Для N_F получено значение $1,3 \cdot 10^{19}$ эВ $^{-1}$ см $^{-3}$. При расчете N_F для радиуса локализации взято значение ≈ 30 Å [8] по аналогии с монокристаллом GaSe - бинарным аналогом монокристалла TiGaSe_2 . Значение N_F хорошо согласуется по порядку величины с нашими предыдущими результатами по изучению прыжковой проводимости монокристаллов TiGaSe_2 в переменных электрических полях $N_F = 5,4 \cdot 10^{19}$ эВ $^{-1}$ см $^{-3}$.

По формуле:

$$R(T) = \frac{3}{8} \cdot a \cdot T_0^{1/4} T^{-1/4} \quad (3)$$

определили расстояние прыжков R носителей заряда при различных температурах. С уменьшением температуры от 30 до 10 К значение R увеличивалось от 130 до 170 Å. Как видно, среднее расстояние прыжка R в 5 раз превышает среднее расстояние между центрами локализации носителей заряда.

Из условия [7]:

$$\frac{4}{3} \pi R^3 N_F \cdot \frac{J}{2} = 1 \quad (4)$$

определен разброс ловушечных состояний вблизи уровня Ферми:

$$J = 0,011 \text{ эВ.}$$

Вышеизложенное относилось к случаю проводимости монокристаллов TiGaSe_2 вдоль слоев (σ_{1c}). Несколько иной характер имела температурная зависимость проводимости TiGaSe_2 вдоль оси C кристалла (σ_{1c}). Проводимость образцов, изготовленных в сэндвич-варианте, была измерена в интервале температур 96-293 К (рис.3). К сожалению, при более низких температурах измерения σ_{1c} произвести не удалось в силу малости величины токов в образцах.

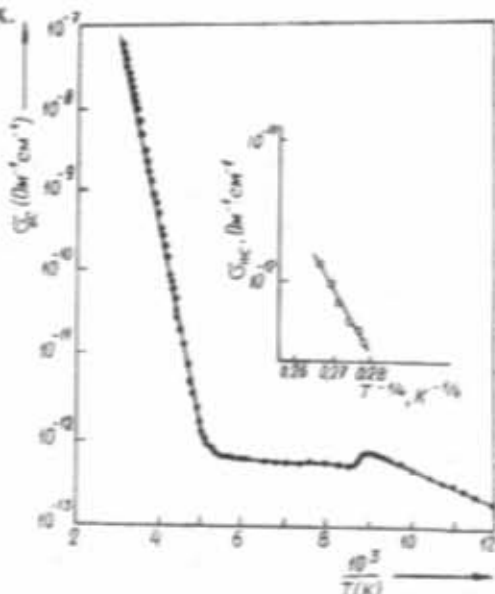


Рис.3. Зависимость σ_{1c} в монокристаллах TiGaSe_2 от температуры в координатах $\lg \sigma_{1c}$ от $10^3/T$ и $\lg \sigma_{1c}$ от $T^{-1/4}$.

Высокотемпературная ветвь зависимости $\sigma_{1c}(T)$ носила экспоненциальный характер. Наклон этой зависимости в интервале температур 210-293 К составлял 0,54 эВ. Ниже 210 К энергия активации проводимости непрерывно уменьшалась и при $T \leq 165$ К σ_{1c} почти не зависела от температуры. Однако, при $T = 113$ К на зависимости $\sigma_{1c}(T)$ наблюдался небольшой "всплеск" проводимости. Как было отмечено выше, в монокристаллах TiGaSe_2 в области температур

100-120 К имеет место фазовый переход. О непрерывном уменьшении энергии активации проводимости до нуля в монокристаллах $TiGaSe_2$ при низких температурах сообщалась и в работе [3], однако причина такого поведения σ в [3] не установлена. Монотонно уменьшающуюся с понижением температуры проводимость σ_{\parallel} $TiGaSe_2$ мы связываем с прыжками носителей заряда по локализованным состояниям вблизи уровня Ферми. Перестроенная в координатах $\lg \sigma_{\parallel}$ от $T^{-1/4}$ зависимость проводимости представлена на вставке рис.3. Наклон этой зависимости составлял $T_0=3,4 \cdot 10^6$ К. Для плотности локализованных состояний вблизи уровня Ферми получено значение $N_F=2 \cdot 10^{18}$ эВ⁻¹см⁻³. Расстояния прыжков носителей заряда поперек слоев монокристаллов $TiGaSe_2$, определенные по формуле (3), составляли: 129 Å при 200 К и 136 Å при 165 К.

Наблюдаемая в $TiGaSe_2$ температурно-независимая проводимость, по-видимому, есть не что иное, как безактивационная прыжковая проводимость, когда прыжки носителей заряда происходят с испусканием фононов.

Полученные нами экспериментальные результаты показали, что при низких температурах как вдоль, так и поперек слоев монокристаллов $TiGaSe_2$ имеет место прыжковый механизм переноса заряда по локализованным вблизи уровня Ферми состояниям. Однако, следует отметить, что прыжковая проводимость вдоль слоев монокристаллов $TiGaSe_2$ становится преобладающей над проводимостью по разрешенной зоне только при очень низких температурах (10-30 К), в то время как поперек слоев $TiGaSe_2$ прыжковая проводимость наблюдается при довольно высоких температурах ($T \leq 210$ К) и охватывает более широкий температурный диапазон.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Isaaks T.J., J.D.Feichther J.Solid State Chem., 1975, v.14, № 3, p.260-263.
- [2] D. Müller, H.Hahn. Zs. Anorg allg. Chem., 1978, v.438, p.258-272.
- [3] И.А.Карпович, А.А.Червова, Л.И.Демидова Изв.АН СССР, неорганические материалы, 1972, т.8, № 1, с.70-72.
- [4] А.М.Дарвиш, А.Э.Бахышев, В.И.Тагиров ФТП, 1977, т.11, № 4, с.780-781.
- [5] С.Н.Мустафаева, С.Д.Мамедбейли, И.А.Мамедбейли, Неорганические материалы, 1994, т.30, № 5, с.626-628.
- [6] С.Г.Абдуллаева, А.М.Абдуллаев, К.К.Мамедов, Н.Т.Мамедов, ФТП, 1984, т.26, №2, с.618-620.
- [7] Н.Мотт, Э.Дэвис. Электронные процессы в некристаллических веществах, М.: Мир, 1974-472 с.
- [8] С.Н.Мустафаева, Неорганические материалы, 1994, т.30, № 5, с. 619-621.

S.N.MUSTAFAYEVA, V.Ə.ƏLİYEV

$TiGaSe_2$ MONOKRİSTALLARINDA YÜKDAŞIMA PROSESİ

$TiGaSe_2$ laylı monokristallarında geniş temperatur intervalında (10÷293 K) elektrikkeçirmənin anizotropiyası və temperatur asılılığı tədqiq olunmuşdur. Göstərilmişdir ki, $TiGaSe_2$ monokristallarında Fermi səviyyəsinin yaxınlığında lokallaşmış səviyyələr boyunca keçiricilik baş verir. Fermi səviyyəsi yaxınlığında enerji hallarının sıxlığı təyin olunmuşdur: $N_F=1,3 \cdot 10^{18}$ ev⁻¹cm⁻³. Sıçrayışların uzunluğu dəyişkən olub, 30 K temperaturda olan 130 Å -dən 10 K temperaturda 170 Å qədər artır.

S.N.MUSTAFAYEVA, V.A.ALIEV

CHARGE TRANSPORT IN LAYER $TiGaSe_2$ SINGLE CRYSTALS.

The present report gives experimental results on the behaviour of the electric conductivities along (σ_{\parallel}) and across (σ_{\perp}) the layers in $TiGaSe_2$ single crystals at 10÷293 K. It was shown that at temperatures $T=10\div30$ K hopping conductivity at Fermi level takes place along the layers in $TiGaSe_2$ single crystals. The conductivity of specimens on the base of $TiGaSe_2$ in sandwich-structure (σ_{\perp}) shows hopping character at the temperatures $T \leq 210$ K. Density of localized states near the Fermi level $N_F=1,3 \cdot 10^{18}$ ev⁻¹cm⁻³ and hopping distances R at various temperatures were calculated, for example, hopping distance along the layers in $TiGaSe_2$ single crystals was equal to 130 Å at 30 K and 170 Å at 10 K.