

САБАХ АБЕД ДАВУД (ИРАК), Т. Г. МАММАДОВ (АЗЕРБАЙДЖАН),
А. К. ФЕДОТОВ, А. В. ЛАРЬКИН, М. С. ТИВАНОВ

ПРЫЖКОВАЯ ПРОВОДИМОСТЬ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ В ЛЕГИРОВАННЫХ МОНОКРИСТАЛЛАХ TlGaSe_2 И TlInS_2

Исследована проводимость на переменном токе $\sigma_{\perp\text{ac}}$ поперек плоскости наилучшего скола в легированных кристаллах TlGaSe_2 и TlInS_2 в области температур $80 \div 300$ К и частот $100 \text{ Гц} < f < 30 \text{ МГц}$. Установлено, что частотные зависимости действительной части адмиттанса соответствуют известному соотношению $\sigma_{\perp\text{ac}} \sim f^\alpha$ с $0,1 < \alpha < 2,0$. Такое поведение интерпретируется как следствие прыжков электронов по дефектным центрам и описано ранее развитой моделью прыжковой проводимости на переменном токе. Результаты исследования температурных зависимостей проводимости на переменном токе для изученных кристаллов показали моттовский закон $\sigma_{\perp\text{ac}} \sim \exp\left[-(T_0/T)^{0,25}\right]$ при $T < 200$ К.

Ключевые слова: адмиттанс; легированный монокристалл; прыжковая проводимость; эффект «отрицательной емкости».

The AC conductivity $\sigma_{\perp\text{ac}}$ across the plane of the best cleavage in doped TlGaSe_2 and TlInS_2 crystals is studied over the temperature $80 \div 300$ K and frequency $100 \text{ Hz} < f < 30 \text{ MHz}$ ranges. It is found that the frequency dependences of a real part of the admittance follow the known relation $\sigma_{\perp\text{ac}} \sim f^\alpha$ for $0,1 < \alpha < 2,0$. This behavior described previously by the developed model for the hopping AC conductivity is interpreted as a consequence of the electron hopping by defect centers. The results obtained in a study of the ac conductivity temperature dependences for the investigated crystals point to the Mott law $\sigma_{\perp\text{ac}} \sim \exp\left[-(T_0/T)^{0,25}\right]$ at $T < 200$ K.

Key words: admittance; doped single crystal; hopping conductivity; the effect of «negative capacitance».

Сегодня повышенное внимание материаловедов направлено на исследование тройных соединений TlGaSe_2 и TlInS_2 , принадлежащих к группе слоистых халькогенидных кристаллов. Большой интерес к кристаллам такого рода объясняется в первую очередь широкими возможностями их практического применения в оптоэлектронике вследствие особых электрических и оптических свойств. Кроме того, данный интерес обусловлен наличием множества фазовых переходов (превращений), сосуществованием сегнетоэлектрических и полупроводниковых свойств, а также сильной анизотропии свойств в этих кристаллах [1–8].

В последние годы активно исследуются легированные кристаллы TlGaSe_2 и TlInS_2 с целью выявления роли изменения электронной подсистемы в характере фазовых переходов и механизмов транспорта носителей заряда в них. В работах [7, 8], в частности, доказано подавление фазовых переходов с ростом концентрации примесей и изучено влияние легирования на появление прыжковой проводимости на постоянном и переменном токе при приложении электрического поля вдоль направления слоев со слабой межмолекулярной связью (перпендикулярно кристаллографической оси C). Однако изучение прыжковой проводимости при приложении электрического поля поперек слоев со слабой межмолекулярной связью (вдоль кристаллографической оси C) в легированных кристаллах такого типа не было проведено.

Поэтому целью данной работы являлось изучение механизмов электропереноса в широкой области температур и частот в легированных различными электрически активными примесями кристаллах TlGaSe_2 и TlInS_2 при движении носителей перпендикулярно слоям легкого скола кристаллов.

Методика эксперимента

В качестве объектов эксперимента были использованы монокристаллы TlGaSe_2 и TlInS_2 , легированные Fe, Ag, В, Tb, Er и Al, полученные модифицированным методом Бриджмена [7, 8]. Результаты электронно-микроскопического и химического анализа исследованных кристаллов описаны ранее в работах [7, 8]. Проводимость на переменном токе, измерявшаяся вдоль плоскости наилучшего скола (перпендикулярно оси C), и фазовые переходы были исследованы нами в работе [8].

Для уменьшения электросопротивления образцов в этих измерениях использовались тщательно отшлифованные, отполированные и очищенные образцы в виде параллелепипедов толщиной 1–3 мм, шириной 4–5 мм и длиной 4–6 мм, ориентированных широкой гранью вдоль полярной оси. Широкие грани образцов были покрыты с помощью ультразвуковой пайки контактными площадками из индия. Механизмы электропереноса в образцах легированных кристаллов изучались путем анализа температурных и частотных зависимостей действительной части удельной проводимости на переменном токе (удельный адмиттанс) $\sigma_{\perp\text{ac}}(T, f)$ и углов фазового сдвига между током и напряжением $\theta_{\perp}(T, f)$. Адмиттанс образцов измерялся двухзондовым методом при пропускании электрического тока поперек плоскости скола в интервале температур $80 \div 300$ К на автоматизированном лабораторном комплексе CFHF Cryogenics Ltd на базе рефрижератора замкнутого цикла. Стабилизация температуры с точностью 0,005 К осуществлялась с помощью контроллера Lakeshore Model 331. Система также включала прецизионные LCR-метры Agilent типа 4980A и 42841A и компьютерную систему управления температурой и частотой, что позволяло проводить измерения амплитуды и фазы тока в исследуемых образцах в диапазоне частот $40 \div 3 \cdot 10^7$ Гц, на основании которых и рассчитывались действительная и мнимая части адмиттанса.

Адмиттанс $\sigma_{\perp ac}(T, f)$ и углы фазового сдвига $\theta_{\perp}(T, f)$

Примеры зависимостей действительной части адмиттанса $\sigma_{\perp ac}(T, f)$ и углов сдвига $\theta_{\perp}(T, f)$ легированных кристаллов представлены на рис. 1. Как показали исследования кристаллов TlGaSe_2 и TlInS_2 , легированных Fe, В, Ag, Al, Tb и Eg, частотные зависимости адмиттанса, измеренные при пропускании электрического тока перпендикулярно плоскостям скола, указывают на следующие общие особенности их поведения. Первая особенность для обоих типов кристаллов состоит в сигмоидной форме кривых $\sigma_{\perp ac}(f)$ в области $f < 1$ МГц, так что в области низких (менее 500 Гц) и высоких (выше 100 кГц) частот кривые выходят на постоянные значения («полочки»). Вторая особенность состоит в том, что для большинства образцов при промежуточных частотах зависимость $\sigma_{\perp ac}(f)$ характеризуется степенными законами

$$\sigma_{\perp ac}(f) \sim f^{\alpha}, \quad (1)$$

где показатель степени α либо равен 0,8 для известной модели Мотта [12], либо зависит от частоты (см. ниже). Эти две особенности, согласно работам [9–11], указывают на прыжковый характер переноса носителей заряда в исследованной области температур и частот. Третья особенность в поведении проводимости на переменном токе состоит в том, что в области температур $80 \div 300$ К угол фазового сдвига между током и напряжением в области частот ниже 1 МГц при использованной геометрии измерения всегда отрицателен и достигает значений $-60^\circ < \theta_{\perp} < -90^\circ$. В то же время в диапазоне частот 1–10 МГц образцы переходят в область положительных значений θ_{\perp} , достигая значений до $+60^\circ \div +80^\circ$ (см. вставки на рис. 1). Последнее указывает на наличие так называемого эффекта отрицательной емкости, т. е. преобладание индуктивной составляющей в реактивной части адмиттанса [9]. Это является дополнительным указанием на справедливость предположения о реализации в изученных образцах прыжковой проводимости через механизм, описанный в работах [9–11].

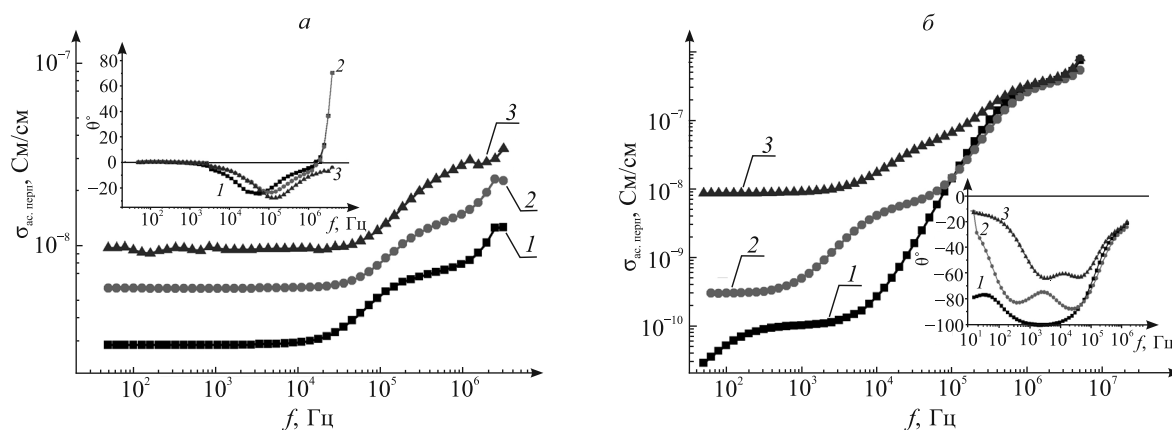


Рис. 1. Частотные зависимости действительной части адмиттанса $\sigma_{\perp ac}(f)$ для легированных 1 % В кристаллов TlGaSe_2 (а) и TlInS_2 (б) при разных температурах: 1 – $T = 81$ К; 2 – $T = 173$ К; 3 – $T = 273$ К. Вставки: частотные зависимости угла сдвига фаз при тех же температурах

Анализ прыжкового электропереноса в легированных кристаллах TlGaSe_2 и TlInS_2

Для интерпретации измеренных зависимостей $\sigma_{\perp ac}(T, f)$ и $\theta_{\perp}(T, f)$ приведем основные особенности модели электропереноса на переменном токе, приведенной в работах [9–11]. В данной модели рассматривается движение электронов, локализованных в потенциальных ямах полупроводника, которые созданы дефектами (в нашем случае – примесями). В соответствии с моделью под действием первого полупериода слабого электрического поля электрон осуществляет первый прыжок с нейтрального дефекта (ямы) 1 на нейтральный дефект (яму) 2, в результате чего два зарядившихся дефекта формируют электрический диполь. Вследствие поляризации среды, окружающей диполь, электрон остается во второй яме в течение некоторого времени τ_0 , которое много больше времени максвелловской релаксации τ_M (поскольку для следующего прыжка электрону надо преодолеть некоторый энергетический барьер). По прошествии времени τ_0 электрон под действием колебательной энергии атомов преодолевает этот барьер либо переходя на следующий дефект 3 (вдоль направления внешнего электрического поля) с вероятностью p , либо возвращаясь на дефект 1 (в направлении, противоположном приложенному полю) с вероятностью $(1 - p)$.

Взаимодействие электронов в двух соседних потенциальных ямах приводит к определенным перераспределениям вероятности прыжка p за время τ_0 , поскольку время жизни электрона в яме не является

одинаковым для всех ям. Авторы [11] показали, что распределение времен τ_0 может быть нормальным либо близким к нему. Согласно модели кривые $\sigma_{ac}(f)$ должны иметь сигмоидную форму, выходя на два независимых от частоты плато – $\sigma_{нч}$ при низких частотах и $\sigma_{вч}$ при высоких частотах. При этом показатель α в соотношении (1), согласно модели, зависит от вероятности прыжка p , а следовательно, от частоты, изменяясь в диапазоне $0 < \alpha(f) < 2$. Для малых значений p величины частотного коэффициента $\alpha(f)$ близки к 2, что соответствует ситуации, когда прыжок происходит между нейтральными потенциальными ямами. В результате такого прыжка ямы получают противоположные заряды (возникает электрический диполь), а электрическое поле диполя заставляет подвижный заряд возвращаться в первую яму. Малые величины α соответствуют большим значениям вероятности прыжка p . Когда величина вероятности достигает $p = 0,5$, адмиттанс перестает зависеть от частоты переменного тока и величина α становится равной нулю. Такая ситуация может возникать, например, при обмене зарядом между нейтральной и заряженной потенциальными ямами.

Наличие низко- и высокочастотных «полок» $\sigma_{нч}$ и $\sigma_{вч}$ на сигмоидообразных экспериментальных зависимостях $\sigma_{ac}(f)$ позволяет оценить вероятность прыжка из соотношения

$$p = \sigma_{нч}(f \rightarrow 0) / 2\sigma_{вч}(f \rightarrow \infty),$$

где значения действительной части адмиттанса в области низких и высоких частот, согласно [9–11], практически не зависят от частоты.

В соответствии с этой моделью вид зависимости $\alpha(f)$ в соотношении (1), которая и определяет вероятность перескока p , имеет форму кривой с максимумом при некотором $f = f_{max}$, совпадающем с точкой пересечения оси частот кривых $\theta(f)$ на вставках на рис. 1. Согласно [9–11] величина f_{max} связана с характерным временем задержки τ_0 соотношением

$$\tau_0 = \frac{1}{2} f_{max}.$$

Прежде чем интерпретировать поведение проводимости на переменном токе в изученных кристаллах, рассмотрим поведение частотного фактора $\alpha_{\perp}(f)$ и отметим наиболее характерные особенности зависимостей, полученных путем графического дифференцирования кривых $\sigma_{\perp ac}(f)$ по частоте. Пример кривых $\alpha_{\perp}(f)$ показан на рис. 2.

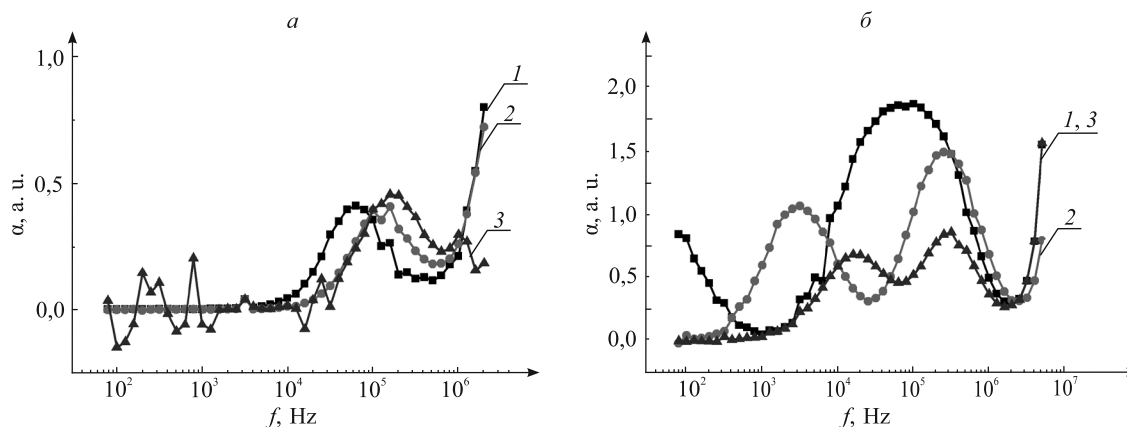


Рис. 2. Частотные зависимости фактора $\alpha_{\perp}(f)$ для легированных 1 % В кристаллов $TlGaSe_2$ (а) и $TlInS_2$ (б) при разных температурах: 1 – $T = 81$ К; 2 – $T = 173$ К; 3 – $T = 273$ К

Первая особенность состоит в том, что при легировании кристаллов $TlGaSe_2$ алюминием и серебром кривые $\alpha_{\perp}(f)$ характеризуются наличием максимума в области частот 10^3 – 10^4 Гц, тогда как в кристаллах $TlInS_2$, легированных железом и алюминием, и в кристаллах $TlGaSe_2 < Fe >$ максимум $\alpha_{\perp}(f)$ сдвигается в область частот порядка 10^5 Гц (см. рис. 2 и таблицу). Вторая особенность наблюдается только у кристаллов, легированных бором, и состоит в том, что зависимость $\alpha_{\perp}(f)$ характеризуется двумя максимумами (см. рис. 2, б).

Проведем сначала анализ кривых $\alpha_{\perp}(f)$ совместно с зависимостями $\sigma_{\perp ac}(f, T)$ на основе известных прыжковых моделей [9–13]. Результаты исследований показали, что прыжковый механизм переноса заряда в большинстве изученных кристаллов обеспечивается либо одним, либо двумя типами потенциальных ям (дефектов). Последнее проявляется, в частности, в двух сигмоидообразных участках в зависимостях $\sigma_{\perp ac}(f)$ для образцов $TlGaSe_2$ и для кристаллов $TlInS_2$ (см. рис. 1, б), легированных бором.

Это, соответственно, дает два максимума на кривых $\alpha_{\perp}(f)$ (см. вставку на рис. 1, б). По положениям максимумов частотного фактора на зависимостях $\alpha_{\perp}(f)$ были оценены времена жизни электронов на дефектных центрах, которые составили $(0,25 \div 250) \cdot 10^{-6}$ с (см. таблицу).

Значения параметров прыжковой проводимости для низких и высоких частот для легированных кристаллов TlGaSe₂, соответствующие измерениям $\sigma_{\perp ac}(f, T)$ на рис. 1 и результатам измерения $\sigma_{\parallel ac}(f, T)$ из работ [7, 8]

Частота, направление	Легированный элемент			
	Fe	B	Al	Ag
α_{\parallel} $10^2 < \omega < 10^3$ Гц	0,11	0,85	0,14	0,42
α_{\perp} $10^2 < \omega < 10^3$ Гц	0–0,3	0–0,5	–	–
ΔE_{\parallel} , мэВ $10^2 < \omega < 10^3$ Гц, $T > 200$ К	6,8	4,5	3,0	36,4
ΔE_{\perp} , мэВ $10^2 < \omega < 10^3$ Гц, $T > 200$ К	<5	18,2	–	190
α_{\parallel} $10^5 < \omega < 10^7$ Гц	–	0,97	0,13	0,30
α_{\perp} $10^5 < \omega < 10^7$ Гц	0,5–0,8	0,3–0,5	–	–
ΔE_{\perp} , мэВ $10^5 < \omega < 10^7$ Гц, $T > 200$ К	<5	22	–	19,5
$T_{0\perp}$, К $10^2 < \omega < 10^3$ Гц, $T < 200$ К	–	119 822	–	170 643
$T_{0\perp}$, К $10^5 < \omega < 10^7$ Гц, $T < 200$ К	–	172 447	–	130 677
τ_0 , мкс	0,25	250	250	200

Исследование температурных зависимостей прыжковой проводимости на переменном токе в области температур ниже комнатной показало следующее. Как видно из рис. 3, а, в области температур выше 200 К температурные зависимости в аррениусовых координатах для $\sigma_{\parallel ac}$ (результаты взяты из работ [7, 8]) и $\sigma_{\perp ac}$ могут быть линеаризованы практически для всех измеренных легированных кристаллов, однако с наклонами аррениусовых прямых ниже тепловой энергии ионизации примесей (что указывает на прыжковый характер электропереноса). Оцененные энергии активации ΔE прыжков в этой области температур при низких (100–1000 Гц) и высоких ($f > 100$ кГц) частотах приведены в таблице. Как видно, в низкочастотной области величины ΔE_{\parallel} весьма близки к тем, что были получены ранее [7] при изучении проводимости на постоянном токе. Кроме того, в низкочастотной области, как правило, $\Delta E_{\perp} > \Delta E_{\parallel}$, тогда как при высоких частотах этого не наблюдается.

При температурах ниже 200 К в ряде исследованных образцов наблюдалась линеаризация кривых $\sigma_{\perp ac}(T)$ в координатах Мотта $\lg \sigma_{\perp ac} - (1/T)^n$ (см. рис. 3, б). Это свидетельствует о том, что в случае электропереноса поперек слоев с молекулярной связью при понижении температуры происходит переход от прыжковой проводимости с постоянной длиной прыжка [9–11] к проводимости с переменной длиной прыжка по локализованным состояниям в окрестности уровня Ферми [12, 13], которая описывается соотношением

$$\sigma(T) = \sigma_0 \cdot \exp\left(-\left(\frac{T_0}{T}\right)^n\right),$$

где σ_0 – проводимость при $T \rightarrow \infty$; $T_0 = (16 / N_F k a^3)$ – характерная температура, связанная с плотностью локализованных состояний N_F и радиусом локализации a носителей заряда [14]; k – постоянная Больцмана; n – показатель, характеризующий механизм проводимости с переменной энергией активации ($n = 0,25$ для механизма Мотта [12] и $n = 0,5$ для механизма Шкловского – Эфроса [13]).

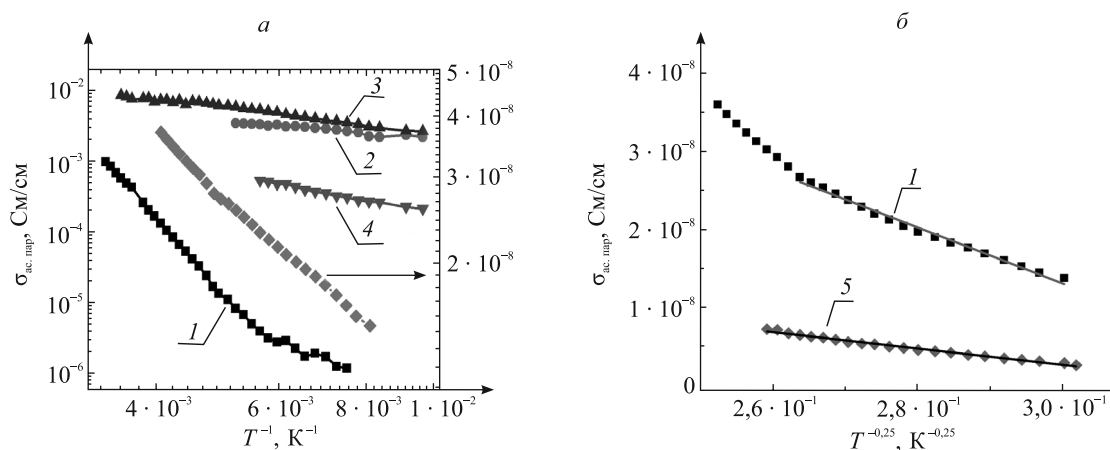


Рис. 3. Температурные зависимости: *a* – $\sigma_{\text{ac}}(T)$ для кристаллов TlGaSe_2 , легированных 0,2 % Ag (1), 0,2 % Al (2), 1 % B (3) и 0,3 % Fe (4) [7, 8]; *б* – σ_{ac} для кристаллов TlGaSe_2 , легированных 0,2 % Ag (1) и 1 % B (5) в моттовских координатах. Частота измерения 500 Гц

Из примера на рис. 3, *б*, следует, что наилучшая линейризация кривых $\lg \sigma_{\text{ac}} - (1/T)^n$ ниже 200 К (как при низких, так и в особенности при высоких частотах) наблюдается лишь при $n = 0,25$ в соотношении (2), что указывает на преобладание моттовского механизма прыжков с переменной длиной. Оценки параметра T_0 в (2) для изученных образцов представлены в таблице. С помощью приведенного выше соотношения, связывающего параметры T_0 , N_F и a , были определены значения плотности локализованных состояний вблизи уровня Ферми, которые оказались в диапазоне $(0,3 \div 2,5) \cdot 10^{18} \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-3}$. При расчете N_F использовались значения радиуса локализации $a \approx 3$ нм, ранее определенные для монокристаллов GaSe [14, 15]. Рассчитанные значения N_F весьма близки к величинам, полученным в работе [15] для нелегированных монокристаллов TlGaSe_2 .

Таким образом, проведенное исследование показало, что в легированных кристаллах TlGaSe_2 и TlInS_2 ниже комнатных температур при пропускании тока как вдоль, так и поперек слоев со слабой химической связью (плоскость наилучшего скола) реализуются прыжковые механизмы электропереноса с постоянной (при $T > 200$ К) и с переменной (при $T < 200$ К) длиной прыжка.

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ, грант № Ф09А-006.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Panich A. M., Kashida S. Single-crystal NMR for the layered semiconductor TlGaSe_2 // J. of Physics: Condensed Matter. 2008. Vol. 20. P. 3–31.
2. Incommensurate phase properties of TlGaSe_2 layered crystals / E. Senturk [et al.] // Crystal Research and Technology. 2005. Vol. 40, iss. 3. P. 248–252.
3. Dielectric susceptibility behaviour in the incommensurate phase of TlInS_2 / F. A. Mikailov [et al.] // Physica B. 2003. Vol. 334. P. 13–20.
4. Phase Transactions and Metastable States in TlGaSe_2 / F. A. Mikailov [et al.] // Phase Transactions. 2003. Vol. 76. P. 1057–1064.
5. Abdullayev N. A., Mammadov T. G., Suleymanov R. A. Negative thermal expansion in the layered semiconductor TlGaSe_2 // Physica Status Solidi (B). 2005. Vol. 242. P. 983–989.
6. Сеидов Х. Ю., Сулейманов Р. А. Аномалии электрофизических, тепловых и упругих свойств слоистых полупроводников-сегнетоэлектриков TlGaSe_2 : нестабильность электронной подсистемы // Физика твердого тела. 2008. Т. 50. С. 1169–1176.
7. Structure and electrical properties of doped TlGaSe_2 and TlInS_2 single crystals / S. A. Dawood [et al.] // Azerbaijan J. of Physics – Fizika. 2011. Vol. 17. P. 27–30.
8. Admittance and permittivity in doped layered TlGaSe_2 single crystals / S. A. Dawood [et al.] // Acta Physica Polonica (A). 2014. Vol. 125, № 6. P. 1267–1271.
9. Dielectric properties and model of hopping conductivity of GaAs irradiated by H^+ ions / P. Zukowski [et al.] // Vacuum. 2007. Vol. 81, iss. 10. P. 1137–1140.
10. Hopping conductivity of metal-dielectric nanocomposites produced by means of magnetron sputtering with the application of oxygen and argon ions / P. Zukowski [et al.] // Vacuum. 2009. Vol. 83, suppl. 1. P. S280–S283.
11. A model of hopping recharging and its verification for nanostructures formed by the ion techniques / P. Zukowski [et al.] // Electrical Review. 2008. Vol. 3. P. 247–249.
12. Mott N. F., Davis E. A. Electronic Processes in Non-crystalline Materials. 2nd ed. Oxford, 1979.
13. Efros A. L., Shklovski B. I. Critical behaviour of conductivity and dielectric constant near the metal-non-metal transition threshold // Physica Status Solidi (B). 1976. Vol. 76, iss. 2. P. 475–485.
14. Мустафаева С. Н. Электрические свойства монокристаллов TlGaSe_2 // Неорган. материалы. 1994. № 5. С. 619–625.
15. Мустафаева С. Н., Алиев В. А., Асадов М. М. Анизотропия прыжковой проводимости в монокристаллах TlGaSe_2 // Физика твердого тела. 1998. № 40. С. 48–51.

Поступила в редакцию 17.09.2014.

Сабих Абед Давуд – стажер кафедры энергофизики физического факультета БГУ. Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры энергофизики Н. А. Дроздов.

Тофиг Гамбаевич Маммадов – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Института физики НАН Азербайджана.

Александр Кириллович Федотов – доктор физико-математических наук, профессор кафедры энергофизики физического факультета БГУ.

Андрей Викторович Ларькин – младший научный сотрудник кафедры энергофизики физического факультета БГУ.

Михаил Сергеевич Тиванов – кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой энергофизики физического факультета БГУ.

УДК 536.621:579.842.11

А. И. ДРАПЕЗА, Н. В. ПЛЕШКО, В. А. ЛОБАН, Г. А. СКОРОХОД, Е. И. ГУДКОВА

МЕТОД ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ТЕРМОГРАММ НА ОСНОВЕ МИКРОТЕРМОРЕЗИСТОРОВ ДЛЯ УСКОРЕННОЙ ОЦЕНКИ ЖИЗНЕСПОСОБНОСТИ БАКТЕРИАЛЬНОЙ ПОПУЛЯЦИИ *E. COLI*

На примере бактерий *E. coli* показана эффективность метода регистрации дифференциальных термограмм с помощью микротерморезисторов для ускоренной оценки жизнеспособности интактной и инактивированной популяции используемой тест-культуры. Установлено, что жизнеспособность бактерий в питательной среде ТСБ (триптиказо-соевый бульон) при температуре 37 °С проявляется в эндотермическом характере метаболизма относительно контроля и экзотермическом – при температуре 30 °С. Метод позволяет оценить жизнеспособность бактерий в течение 80 мин при плотности популяции в пределах 10³ КОЕ/мл. Найдено также, что в 5 % растворе глюкозы тип метаболизма в зависимости от температуры по отношению к питательной среде ТСБ является противоположным при той же чувствительности и продолжительности измерений. Показано, что метаболизм бактерий в 5 % растворе глюкозы при температуре 30 °С, в отличие от среды ТСБ при данной температуре, проходит при гораздо меньшем уровне дифференциальной температуры в измерительной ячейке. При этом значения уровня дифференциальной температуры в измерительной ячейке являются соизмеримыми величинами для используемых питательных сред при температуре 37 °С.

Ключевые слова: калориметр; микротерморезисторы; дифференциальные термограммы; жизнеспособность; бактериальная популяция *E. coli*.

By the example of *E. coli* bacteria, the effectiveness of the differential thermogram recording method by means of microthermistors for accelerated evaluation of the intact and inactivated viability of the used test-culture population is demonstrated. It was found that viability of *E. coli* bacteria in a nutrient medium represented by trypticase-soy broth (TSB) is of the thermonegative and thermopositive metabolism type at temperatures 37 °C and 30 °C, respectively. The method enables one to evaluate the bacterial viability within 80 minutes for the population density 10³ CFU/ml. Also, it was found that in 5 % of glucose solution the type of metabolism depending on temperature is opposite to that of the TSB nutrient medium at the same sensitivity and measuring time. It is shown that metabolism of *E. coli* bacteria in 5 % of glucose solution at 30 °C, compared to the TSB nutrient medium at the same temperature, is associated with appreciably lower values of the differential temperature level in a measuring cell. However, the differential temperature levels in the measuring cell are commensurable quantities for the nutrient media used at a temperature of 37 °C.

Key words: calorimeter; microthermistors; differential thermograms; viability; bacterial population of *E. coli*.

Постановка задачи исследований и разработки

Экспрессная оценка жизнеспособности бактерий необходима при решении многих задач практической и экспериментальной микробиологии. Выявление низких уровней бактериального загрязнения сырьевых и конечных продуктов различных биотехнологических производств, определение эффективных режимов использования антимикробных препаратов, исследования в области создания новых химических соединений, обладающих антибактериальной активностью, – далеко не полный перечень такого рода задач.

Для оценки жизнеспособности микроорганизмов применяют как прямые, так и косвенные методы. Обобщенная классификация данных методов представлена на рис. 1 [1]. Прямые и косвенные методы, согласно классификации рис. 1, основаны на регистрации репродуктивной способности проявлений жизнедеятельности микроорганизмов.

Процесс выявления жизнеспособных микроорганизмов прямыми методами, которые базируются в основном на культивировании микроорганизмов с использованием питательных сред, занимает временной интервал от одних до нескольких суток. В микробиологии эти методы выступают в качестве «золотого стандарта» и в силу своей большой временной длительности не могут являться экспрессными.

Оценка жизнеспособности популяции микроорганизмов на основе косвенных методов развивается (см. рис. 1) преимущественно по двум направлениям: регистрации состояния клеточной мембраны и регистрации метаболической активности микроорганизмов.