

ИНЖЕКЦИОННЫЕ ТОКИ В МОНОКРИСТАЛЛЕ $TlInS_2$

С.Н.МУСТАФАЕВА, А.А.ИСМАИЛОВ

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

Изучены инжекционные токи в высокоомных образцах слоистого монокристалла $TlInS_2$ и определены следующие параметры: равновесная концентрация носителей заряда в разрешенной зоне $p_0=1,67 \cdot 10^{10} \text{см}^{-3}$, концентрация уровней прилипания $N_t=10^{12} \text{см}^{-3}$, фактор захвата $\theta=0,17$, подвижность носителей заряда $\mu=3,3 \cdot 10^{-3} \text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, глубина залегания локального уровня, ответственного за инжекционный ток $E_t=0,44 \text{эВ}$.

Изучение процессов переноса заряда в образцах слоистого монокристалла $TlInS_2$ при постоянном и переменном токе показало, что при низких температурах ($T < 200 \text{К}$) и частотах диапазона $10^5 \div 10^6 \text{Гц}$ в них имеет место прыжковая проводимость по локализованным вблизи уровня Ферми состояниям [1,2]. В полупроводниках с высокой плотностью локализованных в окрестности уровня Ферми состояний прыжковая проводимость по запрещенной зоне в постоянном электрическом поле и при низких температурах доминирует над проводимостью, обусловленной термовозбужденными носителями заряда в разрешенной зоне. Однако, вблизи комнатной температуры и выше перенос заряда в полупроводниках на постоянном токе, в основном, осуществляется по разрешенной зоне.

Представляло интерес изучить неомическую проводимость по разрешенной зоне монокристалла $TlInS_2$ и установить механизм токопрохождения, что явилось целью настоящей работы.

Образцы из монокристалла $TlInS_2$ для электрических измерений были изготовлены в сэндвич – варианте, так что внешнее постоянное электрическое поле было приложено поперек естественных слоёв монокристалла, т.е. вдоль их C – оси. Контактным материалом к образцам $TlInS_2$ служила серебряная паста. Толщина монокристаллических образцов была порядка $200 \div 280 \text{мкм}$, а контактная площадь составляла $(4 \div 6) \cdot 10^{-2} \text{см}^2$.

На Рис.1 приведены темновые вольтамперные характеристики (ВАХ) образца $Ag-TlInS_2-Ag$ при различных температурах. ВАХ при всех температурах характеризовались довольно продолжительной квадратичной зависимостью $I \sim V^2$.

При температурах 293, 307 и 341К квадратичному участку предшествовал короткий омический участок $I \sim V$. А при 381К во всей изученной области электрических напряжений $I \sim V^2$. При 293К участок $I \sim V^2$ сменялся областью крутого роста тока $I \sim V^{6,5}$.

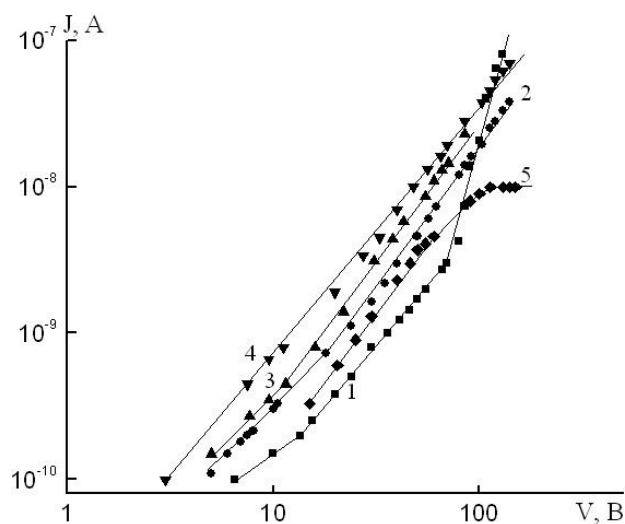


Рис.1

Вольтамперные характеристики темнового (кривые 1, 2, 3, 4) и фототока (кривая 5) монокристаллического образца $Ag-TlInS_2-Ag$. Кривые 1 и 5 сняты при 293К, 2 – 307, 3 – 341, 4 – 381К.

Для объяснения экспериментальных результатов по исследованию ВАХ монокристалла TlInS_2 использовали теорию токов, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ) [3].

В полупроводниках эта теория позволяет получить сведения о локальных уровнях в запрещенной зоне. Локальные уровни оказывают сильное влияние на вызванный внешним электрическим напряжением инжекционный ток. При этом локальные состояния определяют не только величину изменения тока, например, уменьшение инжекционного тока вследствие локализации носителей заряда, но и форму ВАХ. В рамках теории ТОПЗ в полупроводниках с ловушками при временах пролета носителей через полупроводник, превышающих времена захвата на ловушки, до напряжения полного заполнения последних должен течь ток, ограниченный захваченным на ловушки объёмным зарядом, выражение для которого записывается в виде [3]

$$I = \frac{9}{8} \varepsilon \varepsilon_0 \mu \theta \frac{V^2}{L^3}, \quad (1)$$

где ε_0 – диэлектрическая постоянная, ε – диэлектрическая проницаемость кристалла, θ – фактор захвата, L – толщина кристалла, μ – подвижность носителей заряда, V – приложенное электрическое напряжение.

При достижении напряжения полного заполнения ловушек ($V_{\text{ПЗЛ}}$) на графике, изображающем зависимость тока от напряжения в образце TlInS_2 , имеется участок крутого роста тока (рисунок; кривая 1). В этом случае, определив из эксперимента $V_{\text{ПЗЛ}}$, вычислили концентрацию ловушек по формуле:

$$N_t = 1,1 \cdot 10^6 \frac{\varepsilon V_{\text{ПЗЛ}}}{L^2}, \quad (2)$$

$N_t = 10^{12} \text{см}^{-3}$. Нами было определено значение равновесной концентрации основных носителей заряда $p_0 = 1,67 \cdot 10^{10} \text{см}^{-3}$ в TlInS_2 из отношения токов, соответствующих двум напряжениям $V_{\text{ПЗЛ}}$ и $2V_{\text{ПЗЛ}}$ [3]:

$$p_0 = \frac{N_t \cdot I(V_{\text{ПЗЛ}})}{I(2V_{\text{ПЗЛ}})}. \quad (3)$$

Для образца монокристалла TlInS_2 при 293К определили также фактор захвата:

$$\theta = 1,8 \cdot 10^{-6} \frac{p_0 L^2}{\varepsilon V_x}, \quad (4)$$

который оказался равным 0,17. При расчетах для диэлектрической проницаемости монокристалла TlInS_2 взято значение $\varepsilon = 10$, определенное экспериментально в [2]. В формуле (4) V_x – это такое напряжение, при котором концентрация свободных инжектированных носителей заряда становится сравнимой с равновесной концентрацией, другими словами, это напряжение перехода от омического участка к квадратичному.

Зная удельную темновую электропроводность монокристаллического образца TlInS_2 при 293К $\sigma_0 = 10^{-11} \text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, по формуле

$$\sigma_0 = p_0 \cdot e \mu_0, \quad (5)$$

вычислили подвижность дырок при напряжениях, соответствующих омическому участку ВАХ: $\mu_0 = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

Используя экспериментальные результаты по формуле (1) оценили подвижность носителей при напряжениях, соответствующих квадратичной области ВАХ монокристаллического образца TlInS_2 : $\mu = 3,3 \cdot 10^{-3} \text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Как видно, обе величины подвижности, т.е. μ_0 и μ , практически совпадают.

Зная величины N_t и θ , по формуле

$$E_t = kT \ln \frac{N_p}{2\theta \cdot N_t}, \quad (6)$$

где N_p – эффективная плотность квантовых состояний в разрешенной зоне кристалла ($\sim 10^{19} \text{см}^{-3}$), оценили глубину залегания локального уровня, ответственного за инжекционный ток: $E_t=0,44\text{эВ}$. Уровень с энергией активации $\sim 0,4\text{эВ}$ был выявлен и из температурной зависимости омической проводимости поперек слоёв монокристалла TlInS_2 [1], а также из спектров фототока [4].

Отсутствие безловушечного крутого участка на ВАХ образца $\text{Ag-TlInS}_2\text{-Ag}$ при $T>300\text{К}$ связано с тем, что при этих температурах начинались тепловые выбросы носителей заряда с уровня $0,4\text{эВ}$ в разрешенную зону, и полного заполнения ловушек не удавалось достичь (рисунок; кривые 2 – 4).

Освещение образца TlInS_2 , в котором поддерживался ток монополярной инжекции, белым светом приводило к увеличению ТОПЗ (см. рисунок; кривая 5). Это свидетельствует о том, что носители, инжектированные с контакта и захваченные на ловушки, поглощают фотоны и выбрасываются в разрешенную зону, т.е. под влиянием света объемный заряд перераспределяется между состояниями, по которым происходит перенос, и состояниями, в которых находятся захваченные носители. При этом полный объемный заряд в кристалле остается неизменным, он определяется приложенным напряжением и геометрией образца. Как видно из рисунка, фототок, ограниченный пространственным зарядом (кривая 5), также как и темновой ТОПЗ, изменяются в согласии с теорией ТОПЗ. Вблизи напряжения полного заполнения ловушек зависимость фототока от напряжения ослабевает, ВАХ темнового и фототока (кривые 1 и 5) пересекаются, а затем фототок насыщается и перестает зависеть от напряжения. Насыщение фототока с полем объясняется истощением омического контакта: в сильных электрических полях контакт больше не способен обеспечивать достаточное число электронов для установления ТОПЗ в объеме, т.е. центры захвата носителей заряда существенно влияют на фототок. В связи с этим эффекты, связанные с захватом носителей заряда, определяют чувствительность и быстродействие полупроводниковых приборов.

1. С.Н. Мустафаева, *Изв. НАНА. Серия физ.-техн. и мат наук*, **24** (2004) 106.
2. С.Н. Мустафаева, М.М. Асадов, В.А. Рамазанзаде, *ФТТ*, **38** (1996) 14.
3. М.Ламперт, П.Марк, *Инжекционные токи в твердых телах*, Мир, Москва, (1973).
4. С.Н.Мустафаева, М.М.Асадов, В.А.Рамазанзаде, *Неорганические материалы*, **31**(1995) 318.

TlInS₂ MONOKRISTALINDA INJEKSIYA CƏRƏYANI **S.N.MUSTAFAEVA, Ə.Ə.İSMAYILOV**

Yüksəkomlu laylı struktura malik olan TlInS_2 monokristalı nümunəsindən injeksiya cərəyanının keçməsi hadisəsi tədqiq edilmişdir və aşağıdakı parametrlər təyin edilmişdir: sərbəst zonada olan yük daşıyıcılarının tarazlıqdakı konsentrasiyası $p_0=1,67 \cdot 10^{10} \text{sm}^{-3}$, yükdaşıyıcılarını tutan energetik səviyyələrin konsentrasiyası $N_t=10^{12} \text{sm}^{-3}$, tutma faktoru $\theta=0,17$, yükdaşıyıcıların yürüklüyü $\mu=3,3 \cdot 10^{-3} \text{sm}^2/\text{B}\cdot\text{s}$, injeksiya cərəyanını daşıyan lokal səviyyənin dərinliyi $E_t=0,44\text{eV}$.

INJECTION CURRENTS IN TlInS₂ SINGLE CRYSTAL **S.N.MUSTAFAEVA, A.A.ISMAILOV**

Current injection was studied in high-resistive layer TlInS_2 single crystal and following parameters were determined: equilibrium concentration of charge carriers in allowed zone $p_0=1,67 \cdot 10^{10} \text{cm}^{-3}$, concentration of traps $N_t=10^{12} \text{cm}^{-3}$, capture factor $\theta=0,17$, mobility of charge carriers $\mu=3,3 \cdot 10^{-3} \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, the depth of trap level responsible for injection current $E_t=0,44\text{eV}$.

Редактор: А.Халилова