

О фотопроводимости TlInSe_2

© Н.Д. Исмаилов, Ч.И. Абилов, М.С. Гасанова

Азербайджанский технический университет,
Az-1073 Баку, Азербайджан

E-mail: ismailovnamik@yahoo.com

(Получена 25 апреля 2016 г. Принята к печати 28 сентября 2016 г.)

Исследованы вольт-амперные, люксамперные характеристики и кинетика релаксации фотопроводимости монокристаллов TlInSe_2 . Наблюдаемые аномально большие времена релаксации, $\tau \approx 10^3$ с, и другие особенности фотопроводимости объясняются по барьерной теории неоднородных полупроводников. Определена высота дрейфового $E_{dr} \approx 0.1$ эВ и рекомбинационного $E_r \approx 0.45$ эВ барьеров.

DOI: 10.21883/FTP.2017.05.44425.8182

1. Введение

Полупроводниковое соединение TlInSe_2 относится к группе $A^{\text{III}}B^{\text{III}}C_2^{\text{VI}}$ со структурой типа TlSe , обладающее цепочечной структурой. Интерес исследователей к этим материалам обусловлен низкоразмерным характером кристаллической структуры. Исследование данных кристаллов и твердых растворов на их основе в литературе представлено большим количеством публикаций. В частности, они проявляют высокую анизотропию свойств, высокую тензо- и фоточувствительность, радиационную чувствительность, специфичность оптических и электрических свойств [1–7]. Среди электрических свойств можно отметить нелинейное и отрицательное сопротивление, S-образность вольт-амперных характеристик, а также эффект переключения и памяти [8,9]. Фотоэлектрические свойства этих соединений исследовались в работах [10–16]. Разнообразие электрических и фотоэлектрических свойств в этих работах объясняется наличием в полупроводнике различных уровней рекомбинации и прилипания. Однако особо чистые монокристаллы TlInSe_2 , склонные к самокомпенсации, обладают очень высоким сопротивлением и могут быть отнесены к классу сильно компенсированных полупроводников. Как известно, в компенсированных кристаллах неизбежно возникает неоднородность распределения примесей, приводящая к формированию в образце коллективных (макроскопических) потенциальных барьеров [17]. В многокомпонентных твердых растворах группы $A^{\text{III}}B^{\text{III}}C_2^{\text{VI}}$ дополнительными причинами возникновения барьеров является наличие различного рода неупорядоченностей кристаллической решетки, включений другой фазы, кластерных дефектов и т.п. [18,19]. В этом случае анализ физических явлений в рамках классической теории однородных полупроводников оказывается непригодным.

В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования фотопроводимости высокоомных монокристаллов TlInSe_2 . Полученные результаты свидетельствуют о наличии неоднородностей в данном полупроводнике, оказывающих существенное влияние на

их электрические и фотоэлектрические свойства. Анализ полученных результатов проводится по барьерной теории неоднородных полупроводников.

2. Экспериментальная часть

Для изготовления экспериментальных образцов использовались монокристаллы TlInSe_2 , выращенные методом направленной кристаллизации Бриджмена–Стокбаргера. Монокристаллы имели p-тип проводимости и удельную проводимость $\sigma \sim 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. Слитки скальвались на пластины толщиной 0.2–0.5 мм. Контакты изготавливались методом вакуумно-термического осаждения металлов Cu, Ag на одну сторону свежесколотых пластин TlInSe_2 . Фоточувствительная область имела размеры 1×1 мм. Измерения темнового тока и фототока проводились в интервале напряженностей приложенного напряжения $1-5 \cdot 10^4$ В/см как вдоль, так и поперек тетрагональной оси c . Для проведения измерений стационарной фотопроводимости использовалась лампа накаливания мощностью 100 Вт, а для кинетики фототока использовался светодиод с длиной волны излучения $\lambda = 0.9$ мкм. Уровень освещения определялся по фототоку кремниевого фотодиода ФД-24 К с инфракрасным светофильтром.

3. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 показана вольтамперная характеристика образца TlInSe_2 . До напряжения $U \leq 20$ В характеристика линейна, при дальнейшем увеличении напряжения она приобретает сверхлинейный характер. При освещении нелинейность исчезает по мере увеличения интенсивности освещения. На рис. 2 приведена зависимость стационарного значения фототока I_{pc} от интенсивности освещения Φ (люксамперная характеристика) этого образца. Для сравнения приведена также расчетная линейная зависимость. Как видно из рисунка, экспериментальная зависимость суперлинейна при слабых интенсивностях $\Phi \leq 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, она ослабевает при дальнейшем увеличении интенсивности $\Phi \geq 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и выходит

на насыщение при $\Phi > 10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Отметим, что установление стационарного значения тока при малых интенсивностях тока требовало длительного времени. Как было установлено из исследования кинетики установления фототока, это связано с так называемой долговременной релаксацией (ДР) фотопроводимости [17]. На рис. 3 показана характерная картина релаксации фототока при импульсном фотовозбуждении с длительностью импульса $t_u = 1 \text{ мс}$ при различных уровнях освеще-

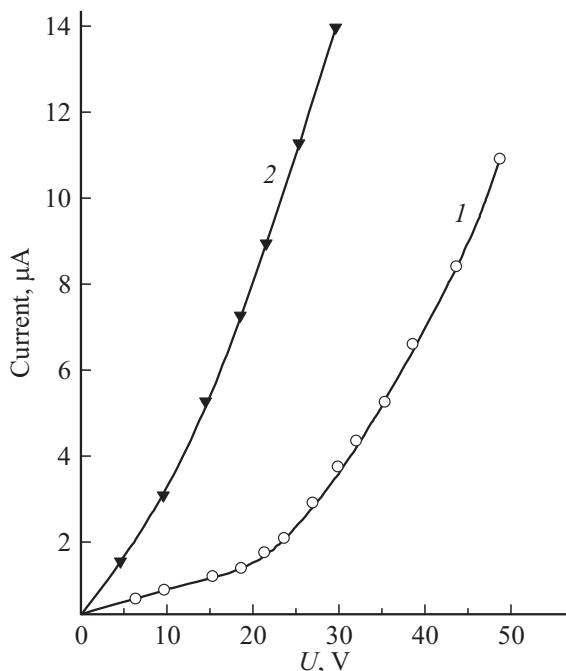


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика образца TlInSe_2 : 1 — в темноте, 2 — на свету.

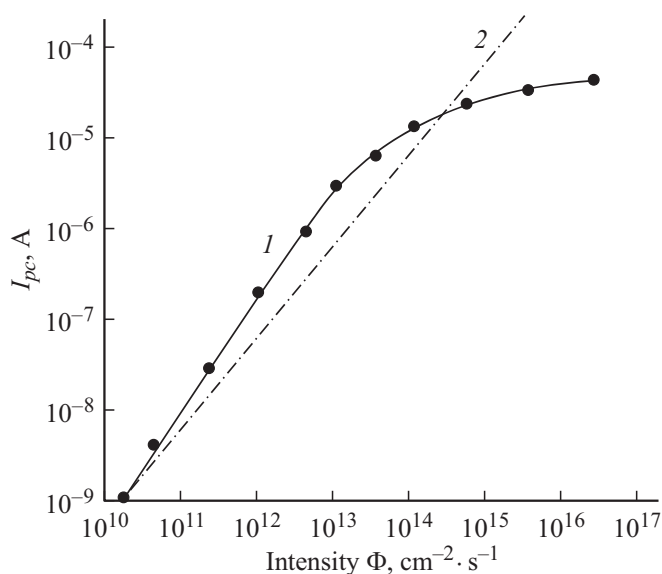


Рис. 2. Люксамперная характеристика образца TlInSe_2 : 1 — экспериментально полученная, 2 — расчетная линейная зависимость.

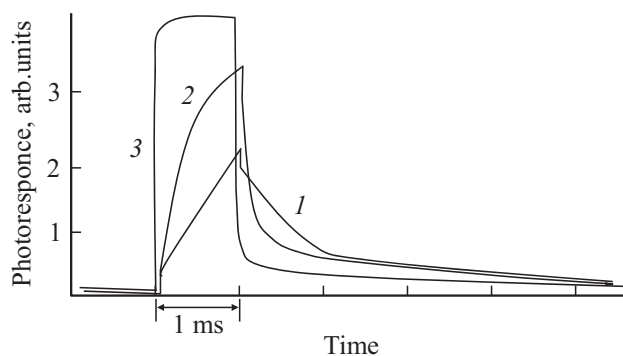


Рис. 3. Осциллограмма фототока при интенсивности излучения: 1 — $\Phi \leq 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, 2 — $\Phi \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, 3 — $\Phi > 10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

нения. Как видно из рисунка, форма импульса фототока зависит от интенсивности фотовозбуждения. При малых интенсивностях фотовозбуждения время нарастания больше t_u и фототок не достигает своего стационарного значения. С увеличением интенсивности фотовозбуждения время нарастания уменьшается и форма импульса приближается к прямоугольной форме. Время нарастания и время спада состоят из небольшого по амплитуде начального участка с $\tau_f = 10\text{--}20 \text{ мкс}$ и последующего участка с $\tau > \tau_f$, причем, по мере увеличения интенсивности освещения τ приближается к τ_f . Замечено, что при малых уровнях импульсного фотовозбуждения, $\Phi \leq 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, наличие постоянной внешней подсветки интенсивностью до $\Phi \leq 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ приводит к увеличению амплитуды импульса фототока в несколько раз, но при этом форма импульса не изменяется. Из рис. 2 можно видеть, что этим интенсивностям соответствует суперлинейная часть люксамперной характеристики (ЛАХ). Важно отметить, что релаксационные кривые характеризуются мгновенным временем релаксации τ , которое увеличивается в ходе релаксации и достигает нескольких десятков минут. Также отметим, что измеренные вольт-амперные характеристики (ВАХ) структур TlInSe_2 , как продольных, так и поперечных по отношению к оси c , зависели от полярности приложенного напряжения и отличались от образца к образцу. Тем не менее наблюдаемые особенности имеют общие черты и закономерности поведения. Явление ДР и все перечисленные экспериментально наблюдаемые особенности хорошо описываются барьерной теорией по модели неоднородного полупроводника с высокоомными включениями в низкоомной матрице [17]. Дальнейший анализ проводится в соответствии с этой теорией. Согласно теории, большие времена релаксации обусловлены наличием в образце коллективных (макроскопических) барьеров, связанных с различного рода неоднородностями. Электрические поля барьеров вызывают пространственное разделение неравновесных носителей заряда, скапливающихся в экстремумах искривлений разрешенных зон (рис. 4). В результате неравновесным носителям для

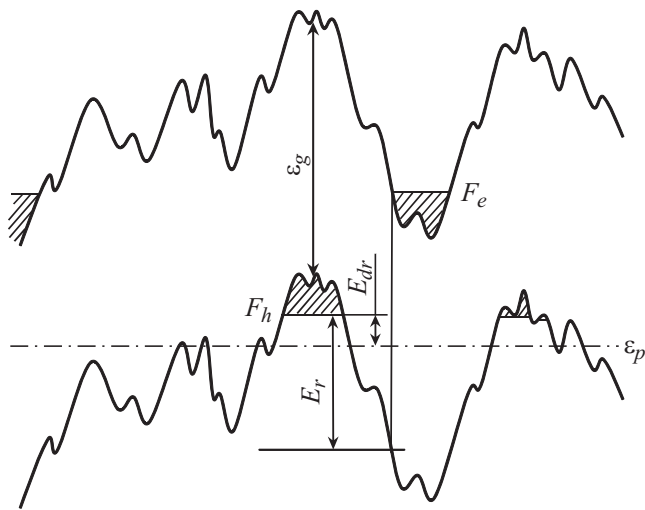


Рис. 4. Случайный потенциальный рельеф в неоднородном полупроводнике p -типа проводимости.

рекомбинации необходимо преодолеть потенциальный барьер $E_r = \varepsilon_g - F_e + F_h$, где F_e и F_h — электронный и дырочный квазиуровни Ферми. Малая вероятность такого активационного или туннельного процесса и приводит к аномально большим временам. Протекание тока через систему также связано с преодолением так называемых дрейфовых барьеров $E_{dr} = F_h - \varepsilon_p$, где ε_p — уровень протекания для дырок. Мгновенное время жизни неравновесных носителей заряда описывается формулой

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{E_r(\Delta p)}{kT}\right), \quad (1)$$

а их стационарная концентрация —

$$\Delta p = \alpha\beta\Phi\tau_0 \exp\left(\frac{E_r(\Delta p)}{kT}\right), \quad (2)$$

где α — коэффициент поглощения, β — квантовый выход, Φ — интенсивность света, τ_0 — время рекомбинации в отсутствие пространственного разделения носителей.

При освещении фотогенерированные носители заряда, разделенные полями неоднородностей, компенсируют эти поля, благодаря чему амплитуда потенциального рельефа, а следовательно, E_r и E_{dr} , с ростом Δp убывают. Поэтому, как следует из (2), зависимость $\Delta p(\Phi)$, определяющая ЛАХ, сублинейна. Из (1) следует, что благодаря зависимости $E_r(\Delta p)$, время жизни носителей в ходе релаксации непрерывно возрастает до значения, определяемого величиной E_r в неосвещенном образце. В исследованных образцах время релаксации достигало $\tau \approx 10^3$ с. При больших интенсивностях освещения, когда потенциальный барьер понижается до $\sim kT$, можно считать, что $\tau = \tau_0$. Величину τ_0 можно отождествить с временем жизни неравновесных носителей в низкоомной матрице — τ_f . С этим и связан начальный малоинерционный участок на релаксационной кривой (рис. 3).

На основе найденных значений τ и τ_f , по формуле (1) можно оценить $E_r \approx 0.45$ эВ.

Для объяснения остальных наблюдаемых особенностей перейдем к рассмотрению ВАХ. Из теории проводимости неоднородных полупроводников с внутренним потенциальным рельефом, обусловленным случайным распределением примеси известно [20], что зависимость тока от поля имеет вид

$$I_\tau = I_{\tau_0} \exp\left(-\frac{E_{dr}}{kT}\right) \exp\left(\frac{\alpha E^{1/2}}{kT}\right), \quad (3)$$

где I_{τ_0} — ток в однородном полупроводнике, $E_{dr} = e(F_p - \varepsilon_p)$ — энергия активации на уровень протекания при малых электрических полях, α — параметр, характеризующий степень неоднородности системы.

При малых электрических полях, когда $E_{dr} \ll E^{1/2}$, ток не зависит от напряжения. Это соответствует омической части наблюдаемой характеристики, которая активационно зависит от температуры. В работах [7,14] приведены температурные зависимости электропроводности TlInSe_2 , на основе которых можно оценить $E_{dr} \approx 0.1$ эВ. На участке сверхлинейного роста тока ВАХ, согласно (3), E_{dr} понижается на величину $(\alpha E)^{1/2}$, т.е. роль электрического поля сводится к сглаживанию потенциального рельефа. Понижение E_{dr} происходит, как было сказано выше, также при освещении, чем и объясняется выпрямление ВАХ по мере увеличения интенсивности освещения.

Аналогичным образом объясняется суперлинейная часть ЛАХ. Наличие белой подсветки дополнительно к тестирующему импульсному излучению должно приводить к сглаживанию потенциального рельефа в валентной зоне. При этом в соответствии с (3), увеличиваются концентрация и подвижность неравновесных носителей заряда. Как известно, величина фототока $I_{pc} \propto \mu_p \tau p$, где p, μ_p — концентрация и подвижность основных

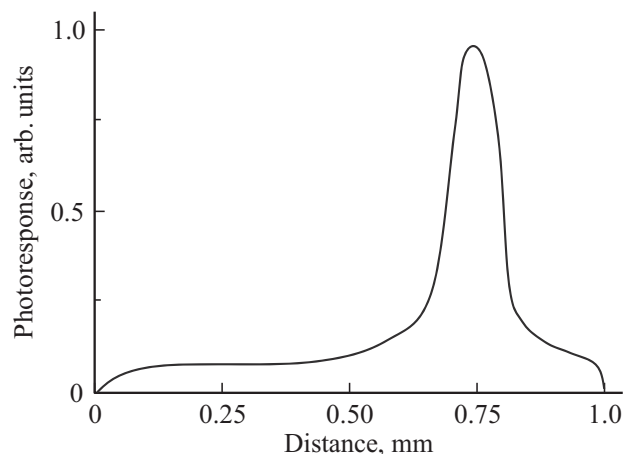


Рис. 5. Распределение фотоответа вдоль образца TlInSe_2 при сканировании лазерным световым зондом диаметром ~ 30 мкм.

носителей заряда. Поскольку при слабых интенсивностях подсветки $\Phi \leq 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, заметного изменения τ не наблюдается (понижение E_r незначительно, так как $E_r > 2E_{dr}$), единственной причиной увеличения импульсного фототока, т.е. суперлинейности ЛАХ, является увеличение подвижности носителей заряда. Это явление также является характерной чертой неоднородных полупроводников [20–22]. При дальнейшем увеличении интенсивности подсветки $\Phi \geq 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, когда понижение E_r уже сказывается на уменьшении τ , увеличение фототока замедляется, ЛАХ постепенно становится сублинейной и выходит на насыщение при $\Phi > 10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (рис. 2).

Наличие в образце неоднородностей носит случайный характер и проявляется на распределении фотоответа по площади образца. Результаты исследования распределения фотоответа по площади образцов, при сканировании лазерным световым зондом диаметром $\sim 30 \text{ мкм}$, свидетельствуют о локализации фоточувствительности преимущественно в высокоомных областях, которые обуславливают большое время жизни и фоточувствительность всего образца. На рис. 5 показано распределение фотоответа одного из образцов, в котором проявляется одна высокоомная область. Из рисунка видно, что характерный размер высокоомной области менее 100 мкм , т.е. носит крупномасштабный характер. Необходимо принять во внимание то, что значительная часть приложенного напряжения распределяется именно на эту область, что надо учитывать при расчете напряженности поля и величины фототока.

4. Заключение

Результаты исследования ВАХ, ЛАХ и кинетики релаксации фототока, а также исследование неоднородности распределения фоточувствительности по площади фоторезисторов из TlInSe_2 свидетельствуют о существенной роли различных неоднородностей в этих монокристаллах. Совокупность наблюдаемых особенностей, таких как долговременная релаксация, влияние освещения на ВАХ и подвижность носителей заряда, сильная неоднородность распределения фоточувствительности по площади образца, изменение характеристик от образца к образцу находят свое объяснение в рамках барьерной теории неоднородных полупроводников. Проведен анализ в соответствии с этой теорией и определены высоты дрейфового барьера $E_{dr} \approx 0.1 \text{ эВ}$, рекомбинационного барьера $E_r \approx 0.45 \text{ эВ}$, время жизни носителей заряда в низкоомной матрице $\tau_f \approx 10 \text{ мкс}$ и характерный размер неоднородности $\approx 50\text{--}100 \text{ мкм}$. В свете этой теории также могут быть хорошо объяснены такие свойства TlInSe_2 , как S-образность ВАХ, эффекты переключения и памяти, высокая тензочувствительность и радиационная чувствительность, свойственные неоднородным полупроводникам [20].

Список литературы

- [1] A.A. Ebnalwaled, R.H. Al-Orainy. Appl. Phys. A, **112**, 4 (2013).
- [2] G.L. Myronchuk, G.E. Davydyuk, O.V. Parasyuk, M.Y. Mozolyuk. Mater. Electron., **24** (8), 3555 (2013).
- [3] P.M. Сардарлы, О.А. Самедов, Н.А. Алиева, А.П. Абдуллаев, Э.К. Гусейнов, И.С. Гасанов, Ф.Т. Салманов. ФТП, **48** (4), 442 (2014).
- [4] I.V. Alekseev. Instr. Exp. Tech., **51**, 331 (2008).
- [5] M. Godzhaev, S.Kh. Khalilov, Kh.S. Khalilova, M.A. Guseinov, A.M. Suleimanova. J. Eng. Phys., Thermophys., **76**, 437 (2003).
- [6] Э.М. Годжаев, Г.С. Джафаров. Неорг. матер., **45** (11), 1317 (2009).
- [7] P.C. Мадатов, А.И. Наджафов, Т.Б. Тагиев, М.Р. Газанфаров, М.А. Мехрабова. ФТП, **53**, 2097 (2011).
- [8] M.P. Haniyas, J.A. Kalomiros, Ch. Karakotsou, A.N. Anagnostopoulos. J. Spyridelis. Phys. Rev. B, **49**, 16994 (1994).
- [9] P.M. Сардарлы, О.А. Самедов, А.П. Абдуллаев, Ф.Т. Салманов, О.З. Алекперов. ФТП, **45** (11), 1441 (2011).
- [10] P.C. Мадатов, А.И. Наджафов, Ю.М. Мустафаев, М.Р. Газанфаров, И.М. Мовсумова. ФТП, **49**, 1202 (2015).
- [11] N.M. Gasanly, T. Yildirim. Acta Physica Polon. A, **119** (3), 437 (2011).
- [12] A.M. Badr, I.M. Ashraf. Physica Scripta, **86** (3), 7 (2012).
- [13] G.E. Davydyuk, O.Y. Khyzhun, A.H. Reshak, H. Kamarudin, G.L. Myronchuk, S.P. Danylchuk, A.O. Fedorchuk, L.V. Piskach, M.Yu. Mozolyuk, O.V. Parasyuk. Chem. Phys., **15**, 6965 (2013).
- [14] P.C. Мадатов, А.И. Наджафов, Т.Б. Тагиев, М.Р. Газанфаров. Электрон. обраб. материалов, **5**, 115 (2010).
- [15] С.П. Данильчук, Г.Л. Мирончук, М.Ю. Мозолюк, В.В. Божко. ФТП, **50** (1), 39 (2016).
- [16] G.D. Guseinov, S.N. Mustafayeva, E.F. Bagirzade, E.G. Abdullayev, S.G. Guseinov. Sol. St. Commun., **55**, 991 (1985).
- [17] Б.И. Шкловский, А.Л. Ефрос. ЖЭТФ, **60**, 28 (1971).
- [18] P.M. Сардарлы, О.А. Самедов, Н.А. Алиева, Э.К. Гусейнов, А.П. Абдуллаев, Ф.Т. Салманов, Э.М. Керимова. ФТП, **49**, 1704 (2015).
- [19] M. Kojiro, N. Takafumi, A. Koji, W. Kazuki, A. Masashi, N. Mamedov, O. Guseyn, N. Hirofumi, T. Masaki, T. Yukihoro, L. Kouichi. Jpn. J. Appl. Phys., **47**, 8188 (2008).
- [20] Б.И. Шкловский. ФТП, **13**, 933 (1979).
- [21] М.К. Шейнкман, А.Я. Шик. ФТП, **10**, 209 (1976).
- [22] В.Г. Карпов, А.Я. Шик, Б.И. Шкловский. ФТП, **16**, 1406 (1982).

Редактор Г.А. Оганесян

About photoconductivity of TlInSe_2

N.D. Ismailov, Ch.I. Abilov, M.S. Gasanova

Azerbaijan Technical University,
Az-1073 Baku, Azerbaijan

Abstract The current-voltage, lux-ampere characteristics and kinetics of relaxation of photoconductivity in single crystals of TlInSe_2 have been investigated. Observed an anomalously large relaxation times $\tau \approx 10^3 \text{ s}$ and other features of the photoconductivity are explained by barrier theory of inhomogeneous semiconductors. The driftbarrierheight of $E_{dr} \approx 0.1 \text{ eV}$ and recombination barrierheight of $E_r \approx 0.45 \text{ eV}$ have been determined.