

УДЛ 621.315.592

## Релаксация темнового тока в монокристаллах $\text{MnGa}_2\text{Se}_4$

© О.В. Тагиев<sup>†\*</sup>, С.Г. Асадуллаева<sup>+</sup>, И.Б. Бахтиярлы<sup>‡</sup>, К.О. Тагиев<sup>‡</sup>

<sup>+</sup> Институт физики Национальной академии наук Азербайджана, Az-1143 Баку, Азербайджан

<sup>\*</sup> Филиал Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова в г. Баку, Az-1143 Баку, Азербайджан

<sup>‡</sup> Институт химии Национальной академии наук Азербайджана, Az-1143 Баку, Азербайджан

(Получена 16 апреля 2012 г. Принята к печати 21 мая 2012 г.)

Представлены результаты исследования изотермических токов, накопления заряда в сэндвич-структурах  $\text{In-MnGa}_2\text{Se}_4\text{-In}$ . Полученные данные проанализированы на основе теории изотермических токов и эстафетного механизма переноса заряда. Показано, что релаксация темнового тока в монокристаллах  $\text{MnGa}_2\text{Se}_4$  связана с накоплением заряда на глубоких уровнях за счет инжекции из катода. Определены следующие параметры: емкость контакта  $C_k = 2 \cdot 10^{-13}$  Ф, толщина слоя сосредоточения заряда  $d_k = 4 \cdot 10^{-6}$  см, дрейфовая подвижность носителей тока  $\mu_3 = 3 \cdot 10^{-8}$  см<sup>2</sup>/В · с в монокристаллах  $\text{MnGa}_2\text{Se}_4$ .

Среди тройных алмазоподобных соединений особое место занимают полумагнитные полупроводники типа  $A^{II}B_2^{III}C_4^{VI}$  ( $A$  — Mn, Fe, Co, Ni;  $B$  — Ga, In;  $C$  — S, Se, Te). Эти соединения привлекают внимание исследователей в связи с возможностью их использования в функциональной электронике для создания приборов, управляемых магнитным полем. Одно из этих соединений,  $\text{MnGa}_2\text{Se}_4$ , кристаллизуется в пространственной группе  $S_4^2$ . С учетом перспективности использования  $\text{MnGa}_2\text{Se}_4$  в функциональной твердотельной электронике актуальным является всестороннее исследование его электрических, люминесцентных, оптических свойств.

Результаты измерений изотермических токов в монокристаллах  $\text{MnGa}_2\text{Se}_4$  объяснены на основе теорий диэлектрической релаксации [1,2] и эстафетного механизма в изоляторах и высокоомных полупроводниках [3,4].

В данной работе для определения параметров ловушечных уровней используются результаты исследования релаксации темнового тока.

Монокристаллы  $\text{MnGa}_2\text{Se}_4$  были получены методом химических транспортных реакций. Эти кристаллы являются полупроводниками с удельным сопротивлением  $10^{10}$  Ом · см при комнатной температуре. При приложении постоянного напряжения к структуре  $\text{In-MnGa}_2\text{Se}_4\text{-In}$  ток  $I$  во внешней цепи сначала резко возрастает, а затем спадает со временем  $t$ , и по истечении некоторого времени устанавливается стационарное значение.

Кривые релаксации тока  $I$  для образцов структуры  $\text{In-MnGa}_2\text{Se}_4\text{-In}$  с толщиной активной области 100 мкм представлены на рис. 1. Сразу после включения напряжения наблюдается рост тока, а затем его спад. При включении внешнего электрического поля и замыкании цепи в ней проходит ток деполяризации, направлении которого противоположно направлению тока, соответствующего электрическому полю. Из рис. 1 видно, что при высоких температурах отношение значений тока,

соответствующих неравновесному и равновесному состояниям, уменьшается и при этом уменьшается время спада тока к стационарному значению.

Наблюдаемый в структурах  $\text{In-MnGa}_2\text{Se}_4\text{-In}$  спад тока сопровождается накоплением заряда. Измерения, проведенные на большом количестве образцов с различными толщиной и площадью контактов, показали, что образующийся заряд пропорционален площади кон-

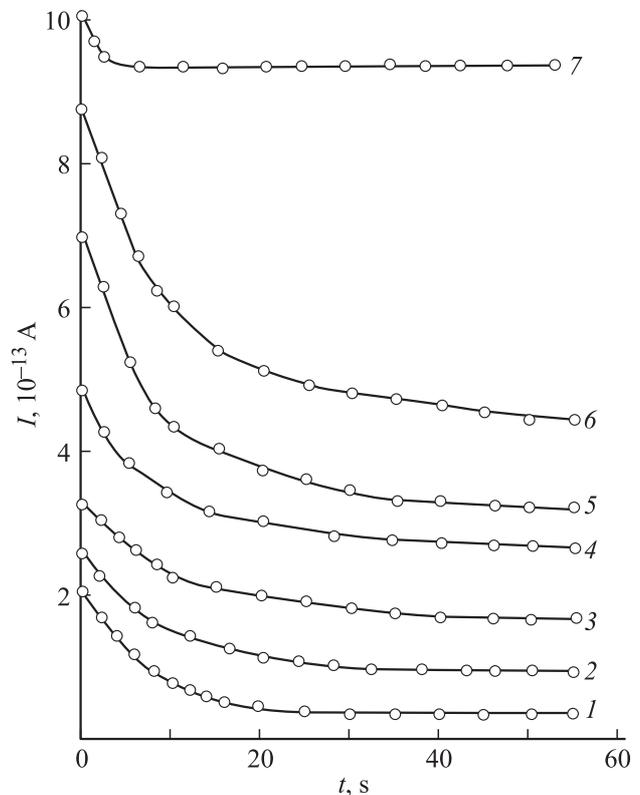


Рис. 1. Релаксация темнового тока в системе  $\text{In-MnGa}_2\text{Se}_4\text{-In}$  при  $U = 400$  В и температурах  $T, \text{K}$ : 1 — 219, 2 — 240, 3 — 262, 4 — 270, 5 — 280, 6 — 309, 7 — 352.

<sup>†</sup> E-mail: oktay58@mail.ru

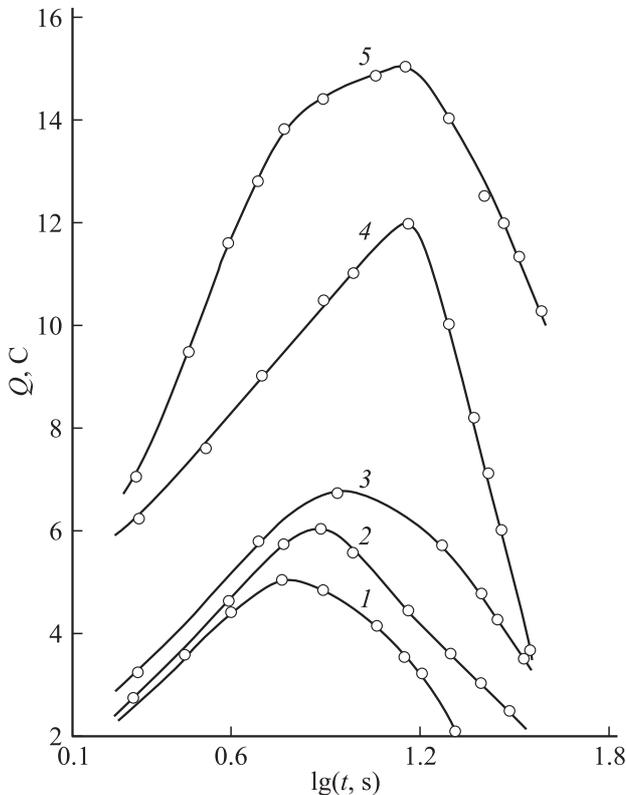
тактов и не зависит от толщины образца. Эта закономерность говорит о том, что заряд накапливается в приконтактной области, а не в объеме.

Полученные экспериментальные результаты объяснены на основе эстафетного механизма переноса инжектированного в кристалл заряда [3,4], когда основной ток протекает не за счет электронов, переносимых через зону проводимости, а за счет электронов, захваченных на центры, имеющие локальные уровни в запрещенной зоне. В результате ток в системе ограничен не только пространственным зарядом в объеме диэлектрика, но и барьером на электроде.

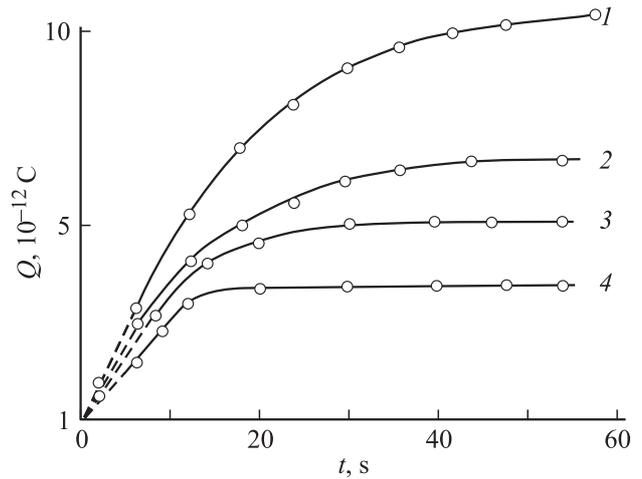
Согласно теории [3], если принять во внимание переход структуры In-MnGa<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>-In из нестационарного состояния в стационарное и построить зависимость произведения тока на время  $It$ , т.е. заряда  $Q$  от  $\lg t$ , то на этой зависимости получается максимум с соответствующим временем  $t_{\max}$  (рис. 2). Из релаксации темнового тока можно определить глубину залегания ловушек [5,6]. Самым чувствительным способом определения энергии уровней ловушек является графическое построение зависимостей в виде  $It = f(\lg t)$ . Такая характеристика имеет максимум, который проявляется при  $t = t_{\max}$  и связан с глубиной залегания  $E_t$  уравнением

$$E_t = kT \ln \nu t_{\max}, \quad (1)$$

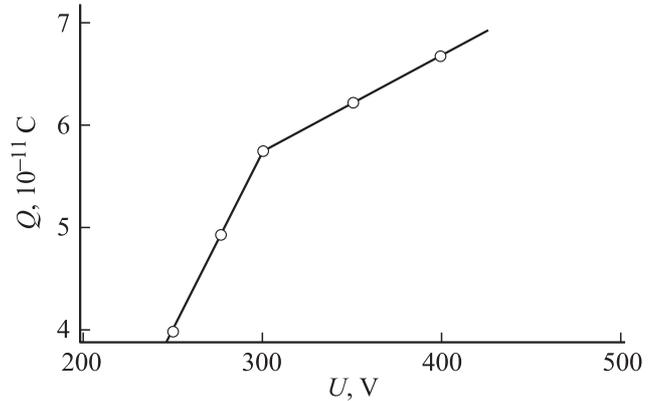
где  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура,  $\nu$  — частотный фактор ( $\nu \sim 10^{13} \text{ с}^{-1}$ ). Отсюда



**Рис. 2.** Зависимости накопленного заряда ( $Q$ ) от времени ( $\lg t$ ) в  $\text{MnGa}_2\text{Se}_4$  при  $U = 400 \text{ В}$ ,  $T, \text{ К}$ : 1 — 219, 2 — 240, 3 — 262, 4 — 270, 5 — 280, 6 — 309.



**Рис. 3.** Зависимости величины накопленного заряда от времени в  $\text{MnGa}_2\text{Se}_4$  при  $U = 200 \text{ В}$ ,  $T, \text{ К}$ : 1 — 239, 2 — 230, 3 — 225, 4 — 221.



**Рис. 4.** Зависимость накопленного заряда от приложенного напряжения в монокристаллах  $\text{MnGa}_2\text{Se}_4$ .

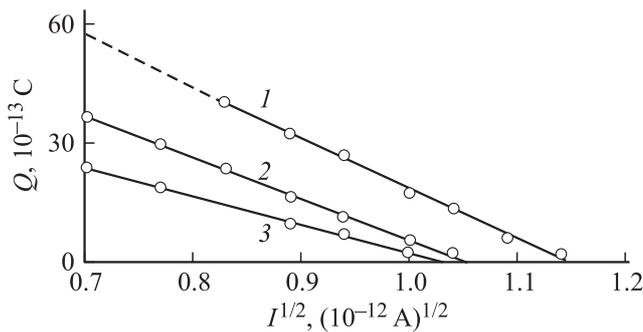
найдена энергия активации ловушек в монокристаллах  $\text{MnGa}_2\text{Se}_4$ :  $E_t = 0.9\text{--}1.1 \text{ эВ}$ .

Заряд, накапливающийся вблизи электрода, описывается выражением [3]

$$Q = UC_k \frac{t}{\tau + t}, \quad (2)$$

где  $t$  — время,  $\tau = L^3 / \mu d_k U$  — постоянная зарядки контакта,  $L$  — толщина образца,  $d_k$  — толщина слоя сосредоточения заряда у анода,  $U$  — приложенное напряжение,  $C_k = \epsilon \epsilon_0 S / d_k$  — электрическая емкость контакта,  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость полупроводника,  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная,  $S$  — площадь контакта,  $\mu$  — подвижность заряда, переносимого через запрещенную зону.

Как следует из (2), при  $t \ll \tau$  и с учетом выражения для  $\tau$  получаем  $Q = (\mu_3 \epsilon S U^2 / d_k^3) t$ , т.е. заряд линейно увеличивается со временем и пропорционален квадрату напряжения, а при  $t \gg \tau$  насыщается и стремится к величине  $UC_k$ . Эти выводы теории [3] хорошо под-



**Рис. 5.** Зависимости величины заряда ( $Q$ ), накопленного в монокристаллах  $\text{MnGa}_2\text{Se}_4$  от  $I^{1/2}$  при  $T = 239$  (1), 230 (2), 225 К (3).

тверждаются результатами, полученными для сэндвич-структур  $\text{In-MnGa}_2\text{Se}_4\text{-In}$  (рис. 3). Видно, что чем ниже температура, тем раньше зависимость  $Q(t)$  насыщается. С ростом температуры накопленный заряд увеличивается. При малых временах зависимость  $Q(t)$  носит примерно линейный характер. С ростом температуры от 221 до 239 К в области насыщения заряд изменяется в интервале  $(4-12) \cdot 10^{-12}$  Кл.

Если исходить из выражения для  $C_k$ , можно заключить, что зависимость  $Q(t)$  от температуры в области насыщения  $Q(t)$  связана с изменением контактной емкости. Контактная емкость при данном приложенном напряжении и известной площади контакта может изменяться за счет изменения толщины  $d_k$  слоя сосредоточения заряда.

В соответствии с выражением для  $Q$  в случае  $t \ll \tau$  построена зависимость  $Q(U)$ , которая представлена на рис. 4. Видно, что между зарядом и напряжением существует линейная зависимость. Эта зависимость состоит из двух линейных участков. Наклоны этих участков равны 2 и 1.5.

В [3] также получено выражение, связывающее заряд  $Q$  и общий ток  $I$ , протекающий через систему металл-диэлектрик-металл:

$$Q = UC_k - \sqrt{\frac{C_k LI}{d_k \mu_3}}. \quad (3)$$

На рис. 5 при различных температурах представлена зависимость накопленного в структуре  $\text{In-MnGa}_2\text{Se}_4\text{-In}$  заряда  $Q$  от квадратного корня общего тока. Рис. 5 показывает, что с ростом  $\sqrt{I}$  тока заряд  $Q$  линейно уменьшается, причем наклон зависимости  $Q = f(\sqrt{I})$  растет. Эти изменения хорошо согласуются с формулой (3). Экстраполяцией прямых  $Q = f(\sqrt{I})$  до пересечения с осью заряда и осью тока найдены величины  $Q_0 = 50 \cdot 10^{-13}$  Кл и  $I_0 = 1.15 \cdot 10^{-12}$  А. На основании этих данных оценены емкость контакта  $C_k = 2 \cdot 10^{-13}$  Ф, толщина слоя сосредоточения заряда  $d_k = 4 \cdot 10^{-6}$  см, эффективная подвижность носителей тока  $\mu_3 = 3 \cdot 10^{-8}$  см<sup>2</sup>/В · с в монокристаллах  $\text{MnGa}_2\text{Se}_4$ .

Полученные данные проанализированы на основе теории изотермических токов и эстафетного механизма

переноса заряда. Показано, что применение метода релаксации темного тока для изучения локализованных состояний в запрещенной зоне высокоомных полупроводников выявляет структуру ловушечных уровней и дает возможность получить информацию о параметрах захвата в монокристаллах  $\text{MnGa}_2\text{Se}_4$ .

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Фонда развития науки при президенте Азербайджанской Республики (грант № EIF-2011-1(3)-82/01/1).

## Список литературы

- [1] А.Я. Вуль, А.Я. Шик. ФТП, **8** (10), 1952 (1974).
- [2] В.И. Архипов, Ю.А. Попов, А.И. Руденко. ФТП, **17** (10), 1817 (1989).
- [3] Б.Л. Тиман. ФТП, **7** (2), 225 (1973).
- [4] Б.Л. Тиман, А.П. Карпова. ФТП, **7** (2), 230 (1973).
- [5] Р.А. Сурис, Б.И. Фукс. ФТП, **14** (8), 1507 (1980).
- [6] J.G. Simmons, G.W. Taylor. Phys. Rev. B, **5** (4), 1619 (1972).

Редактор Л.В. Шаронова

## Relaxation of dark current in $\text{MnGa}_2\text{Se}_4$ single crystals

O.V. Tagiev<sup>+,\*</sup>, S.G. Asadullayeva<sup>+</sup>, I.B. Bachtiyarly<sup>‡</sup>, K.O. Tagiev<sup>‡,\*</sup>,

<sup>+</sup> Institute of Physics,  
Azerbaijan National Academy of Sciences,  
Az-1143 Baku, Azerbaijan

<sup>\*</sup> Branche of Moscow State University  
named after M.V. Lomonosov in Baku,  
Az-1143 Baku, Azerbaijan

<sup>‡</sup> Institute of Chemistry,  
Azerbaijan National Academy of Sciences,  
Az-1143 Baku, Azerbaijan

**Abstract** The result of investigation of isothermal current and charge accumulation in  $\text{MnGa}_2\text{Se}_4$  single crystals are presented in this work. The data obtained are analysed on the basis of the theory of isothermal currents and relay-race charge transport mechanism. It is shown that relaxation of dark current in  $\text{MnGa}_2\text{Se}_4$  single crystals is associated with charge accumulation on deep levels as a result of injection from cathode. On the base of analysis the following parameters have been calculated: contact capacitance  $C_k = 2 \cdot 10^{-13}$  F, the thickness of the charge accumulation layer  $d_k = 4 \cdot 10^{-6}$  cm, the drift mobility of charge carries  $\mu_3 = 3 \cdot 10^{-8}$  cm<sup>2</sup>/V · с  $\text{MnGa}_2\text{Se}_4$  in single crystals.