

©1994 г.

ОБНАРУЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ЛОВУШКИ ПРИ $E_c - 0.41$ эВ В InP:Fe МЕТОДОМ ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННЫХ ТОКОВ

М.В.Калин, Н.Б.Пышная, И.М.Тигиняну

Институт прикладной физики Академии наук Молдовы,
277028, Кишинев, Молдова

(Получена 19 июля 1993 г. Принята к печати 2 февраля 1994 г.)

Приводятся результаты исследования кривых термостимулированных токов в исходных и облученных электронами ($E = 3.5 - 4$ МэВ, $D = 5 \cdot 10^{15} - 3 \cdot 10^{17}$ см⁻²) монокристаллах InP:Fe . В исходных кристаллах обнаружены 5 ловушек с глубинами 0.14, 0.17, 0.27, 0.30 и 0.41 эВ, в то время как в электронно-облученных образцах проявляется только уровень прилипания с глубиной 0.41 эВ. Показано, что при $T < 300$ К активация темновой проводимости кристаллов, облученных электронами при дозе $D = 3 \cdot 10^{17}$ см⁻², обусловлена термическим выбросом электронов с донорно-подобного уровня $E_c - 0.4$ эВ в зону проводимости.

Легирование фосфида индия железом осуществляется с целью получения полуизолирующего материала, т.е. для компенсации мелких неконтролируемых донорных примесей [1]. Глубина уровня акцепторного центра Fe_{In} относительно дна зоны проводимости составляет 0.64 эВ ($T = 6$ К) [2]. Однако энергия активации проводимости в полуизолирующих кристаллах InP:Fe иногда оказывается значительно ниже приведенной величины. В частности, для образцов InP:Fe , исследованных в [3], характерно наличие одной из двух возможных значений энергии активации проводимости (в интервале $T < 300$ К), а именно $E_1 = 0.64$ эВ или $E_2 = 0.44$ эВ. Предполагается, что энергия активации E_2 связана с собственными дефектами решетки, которые также могут принимать участие в эффектах компенсации проводимости. Интересно отметить, что, согласно недавно опубликованным результатам [4], облучение фосфида индия высокоэнергетичными электронами при больших дозах ($E = 3.5 - 4$ МэВ, $D > 2 \cdot 10^{17}$ см⁻²) приводит к закреплению уровня Ферми в узком интервале энергий на глубине $E_c - 0.4$ эВ. Объяснение данного эффекта основывается на преимущественном образовании в решетке InP при облучении электронами радиационного дефекта донорного типа с энергией ионизации ≈ 0.4 эВ [4]. Однако прямое доказательство существования донорного уровня с глубиной ≈ 0.4 эВ в монокристаллах InP:Fe в цитируемых работах отсутствует.

Чтобы проверить наличие уровня вблизи энергии $E_c - 0.4$ эВ, нами было проведено исследование кривых термостимулированных токов (ТСТ) в исходных и электронно-облученных кристаллах InP:Fe.

Использованные монокристаллы выращивались методом Чохральского с жидкостной герметизацией расплава под давлением аргона. Введение примеси железа осуществлялось в процессе выращивания. Концентрация и подвижность электронов в исходных образцах при 300 К составляли $n \simeq 1 \cdot 10^8$ см⁻³ и $\mu_n \simeq 2 \cdot 10^3$ см²/В·с, соответственно. Облучение электронами с энергией $E = 3.5 \div 4$ МэВ проводилось при комнатной температуре флюенсами $5 \cdot 10^{15}$, $2 \cdot 10^{16}$ и $3 \cdot 10^{17}$ см⁻². Для измерения кривых ТСТ образцы охлаждались до температуры жидкого азота, затем освещались белым светом в течение 20–25 с и после определенной выдержки (1 мин) в темноте нагревались со скоростью $\beta = 0.4$ К/с. К образцам прикладывалось постоянное напряжение 9 В.

На рис. 1 показаны температурная зависимость темновой проводимости и кривые ТСТ [в координатах $\lg I = f(10^3/T)$] исходных монокристаллов InP:Fe для двух значений времени экспозиции. Наблюдаются 5 пиков при температурах 85, 102, 146, 160 и 205 К. Следует отметить, что первые 4 пика были обнаружены ранее [3,5]. Пик ТСТ с максимумом при $T = 205$ К в образцах InP:Fe выявлен нами впервые. Для определения глубины E_i обнаруженных уровней была использована

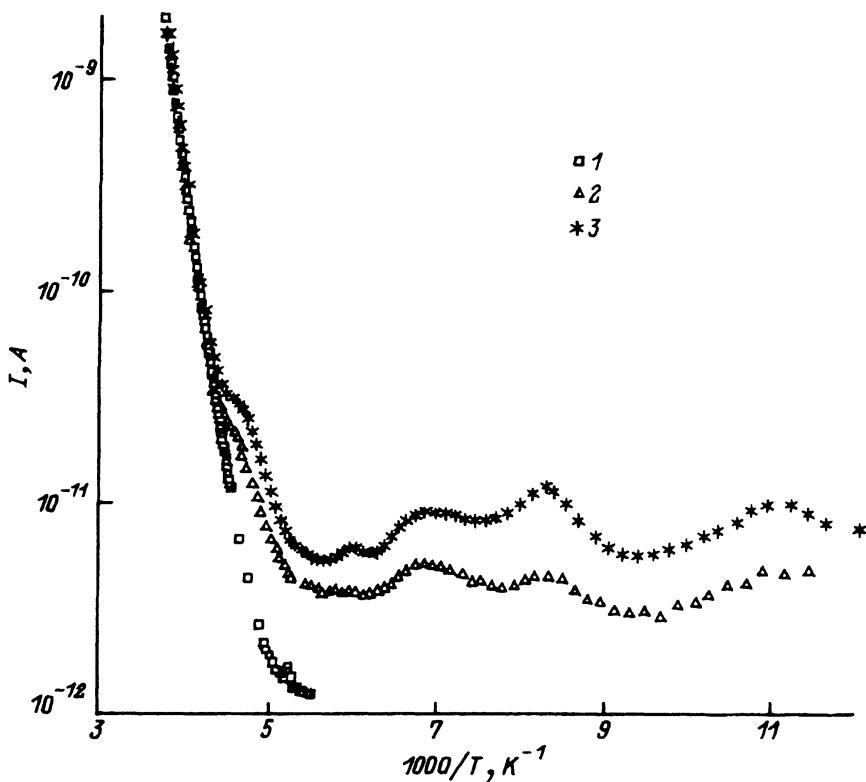


Рис. 1. Температурная зависимость темновой проводимости (1) и кривые ТСТ монокристаллов InP:Fe при длительности освещения белым светом 20 (2) и 25 с (3).

$T_m, K (E_t, \text{эВ})$	$T_m, K (E_t, \text{эВ})$ [3]	$T_m, K (E_t, \text{эВ})$ [5]
85 (0.14)	88 (0.15)	—
102 (0.17)	99 (0.17)	100 (0.16)
—	125 (0.22)	125 (0.22)
146 (0.27)	147 (0.27)	150 (0.27)
160 (0.30)	168 (0.32)	170 (0.31)
205 (0.41)	—	—

зависимость [6]

$$E_t = kT_m \ln(T_m^4/\beta),$$

где k — константа Больцмана и T_m — температура максимума пика ТСТ. Полученные нами значения E_t , а также данные, приведенные в работах [3,5], суммированы в таблице. Как следует из таблицы, самый высокотемпературный пик ТСТ соответствует уровню прилипания с глубиной 0.41 эВ.

На рис. 2 иллюстрируются кривые ТСТ монокристаллов InP:Fe, облученных электронами. Видно, что при тех же условиях эксперимента (длительность экспозиции 25 с) низкотемпературные пики ТСТ

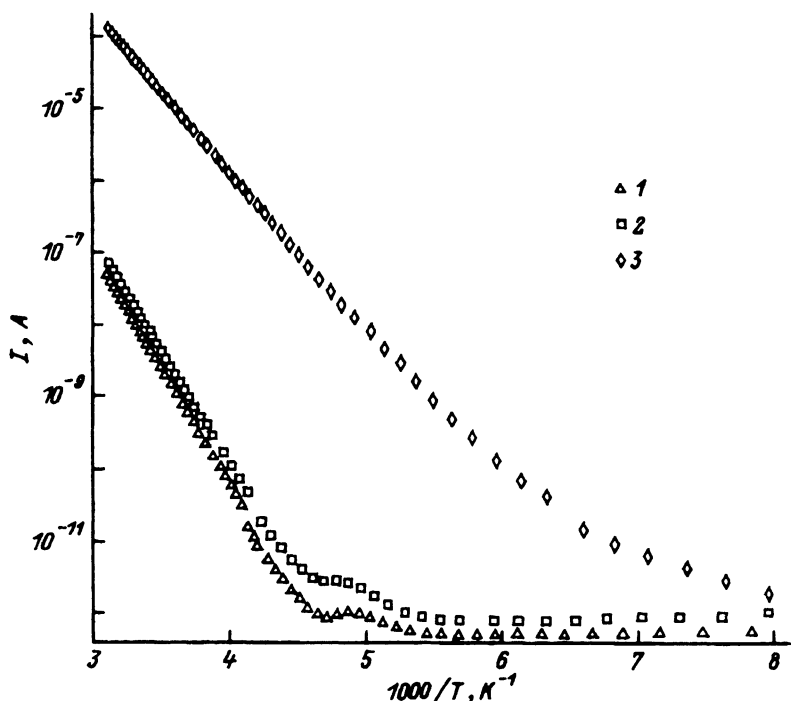


Рис. 2. Кривые ТСТ монокристаллов InP:Fe, облученных электронами при дозах $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (1), $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (2) и $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ (3). Энергии активации на линейных участках кривых, эВ: 1, 2 — 0.64, 3 — 0.44.

практически не проявляются. В то же время пик с максимумом при $T = 205$ К наблюдается при дозах электронного облучения $5 \cdot 10^{15}$ и $2 \cdot 10^{16}$ см^{-2} .

Что касается быстрого роста тока в области высоких температур, то он соответствует, как следует из сравнения кривых на рис. 1, темновой проводимости. Для исходных кристаллов InP:Fe, а также для образцов, облученных электронами при дозах $5 \cdot 10^{15}$ и $2 \cdot 10^{16}$ см^{-2} , энергия активации темновой проводимости составляет $E_a = 0.64$ эВ, что равно глубине уровня акцепторного центра Fe_{In} относительно дна зоны проводимости. Анализ темновой составляющей тока для образцов, облученных электронами при дозе $3 \cdot 10^{17}$ см^{-2} , выявил другое значение энергии активации проводимости, а именно 0.44 эВ (рис. 2). Речь идет об активации электронной проводимости в образцах, что проверялось нами путем изучения эффекта Холла.

Полученные результаты могут быть интерпретированы следующим образом. В исходных образцах компенсация проводимости осуществляется в основном акцепторными центрами Fe_{In} с уровнем при $E_c - 0.64$ эВ. При облучении электронами в решетке кристаллов происходит преимущественное накопление собственных дефектов донорного типа с уровнем вблизи $E_c - 0.4$ эВ, что приводит к смещению уровня Ферми в сторону зоны проводимости. Анализ показывает, что при дозах электронного облучения $5 \cdot 10^{15}$ и $2 \cdot 10^{16}$ см^{-2} уровень Ферми при низких температурах находится между уровнями 0.4 и 0.64 эВ. Этот эффект позволяет обнаружить первый уровень с помощью ГСТ (рис. 2). При дозе облучения $3 \cdot 10^{17}$ см^{-2} уровень Ферми при низких температурах располагается над донорно-подобным уровнем при 0.4 эВ. Это проявляется в эксперименте в обнаружении энергии активации темновой составляющей проводимости $E_a \approx 0.4$ эВ (рис. 2).

Слабое проявление низкотемпературных пиков ГСТ после облучения образцов электронами (рис. 2) можно объяснить, учитывая установленное ранее [7,8] эффективное взаимодействие неконтролируемых примесей с радиационными дефектами InP. Это указывает на возможную примесную природу пиков ГСТ с максимумами при $85, 102, 146$ и 160 К.

Таким образом, в монокристаллах InP:Fe обнаружен донорно-подобный уровень при $E_c - 0.4$ эВ, который связан, по-видимому, с собственными дефектами решетки. Роль этих дефектов в формировании электрических характеристик InP существенно усиливается в результате облучения образцов высокоэнергетичными электронами.

Авторы выражают благодарность Н.А. Соболеву и В.В. Урсаки за содействие при выполнении работы.

Список литературы

- [1] R.L. Henry, E.M. Swiggard. *J. Electron. Mater.*, **7**, 647 (1978).
- [2] S. Fung, R.J. Nicholas, R.A. Stradling. *J. Phys. C: Sol. St. Phys.*, **12**, 5145 (1979).
- [3] Z.-Q. Fang, D.C. Look, J.H. Zhao. *Appl. Phys. Lett.*, **61**, 589 (1992).
- [4] N.B. Pyshnaya, S.I. Radautsan, I.M. Tiginyanu, V.V. Ursaki, V.A. Ursu, I.M. Aliev, H.A. Halilov. *Cryst. Res. Techn.*, **26**, K129 (1991).
- [5] R. Fornari, B. Santic, U. Desnica. *Proc. IV Int. Conf. on InP and Related Materials* (USA, Newport, 1992) p. 511.

- [6] A.G. Milns. *Deep Impurity in Semiconductors* (Wiley, N.Y., 1973) chap. 9.
- [7] Ф.П. Коршунов, С.И. Радауцан, Н.А. Соболев, И.М. Тигиняну, В.В. Урсаки, Е.А. Кудрявцева. ФТП, **23**, 1581 (1989).
- [8] Ф.П. Коршунов, С.И. Радауцан, Н.А. Соболев, И.М. Тигиняну, Е.А. Кудрявцева, В.А. Урсу, И.Н. Цыпленков, В.Н. Ламм, В.А. Шераухов. ФТП, **24**, 2034 (1990).

Редактор В.В. Чалдышев

Direct Evidence of Existance of a Donor Level at $E_c-0.4$ eV in InP-Fe single crystals

M.V. Kalin, N.B. Pyshnaja and I.M. Tiginjanu

Institute of Applied Physics, 277028, Kishinev, Moldova
