

## Влияние облучения электронами на электрофизические параметры $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$

© О.Г. Грушка<sup>†</sup>, В.Т. Маслюк\*, С.М. Чупыра, О.М. Мыслюк, С.В. Биличук, И.И. Заболоцкий

Черновицкий национальный университет им. Ю. Федьковича, 58012 Черновцы, Украина

\* Институт электронной физики Национальной академии наук Украины, 88016 Ужгород, Украина

(Получена 4 августа 2011 г. Принята к печати 16 августа 2011 г.)

Представлены результаты исследования электрофизических свойств кристаллов  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$ , облученных электронами с энергией  $E_e = 18$  МэВ и дозой  $D = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ . Показано, что независимо от концентрации носителей заряда исходного материала образцы  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  после облучения приобретают концентрацию носителей  $(1.6-1.8) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Обсуждается явление стабилизации уровня Ферми в облученном материале. Исходная концентрация носителей заряда, которая практически остается неизменной после облучения и обеспечивает высокую радиационную стойкость кристаллов  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$ , соответствует компенсированному материалу, подобному собственному полупроводнику при  $T > 260$  К.

Создание полупроводниковых приборов со стабильными параметрами и воспроизводимыми характеристиками, которые эксплуатируются при различных внешних воздействиях, в том числе в условиях высокоэнергетической радиации, сопряжено с выбором базовых материалов, отвечающих определенным требованиям. Одним из таких требований является слабое влияние радиационных дефектов на электронные свойства полупроводника. Важны также и другие характеристики, такие как [1]: низкая концентрация носителей заряда, биполярный характер проводимости, высокий порядковый номер в Периодической системе входящих в материал элементов.

Традиционно считается [1], что высокой радиационной стойкостью обладают полупроводники с большой энергией связи (алмаз, нитрид бора, карбид кремния). В то же время у большинства из них отмечаются [1-3] увеличение концентрации носителей заряда и смена типа проводимости после облучения.

Аномально высокая стойкость к действию ионизирующих излучений выявлена в дефектных полупроводниковых соединениях типа  $\text{A}_2^{\text{III}}\text{B}_3^{\text{VI}}$  [4]. Это обусловлено особенностями их кристаллической структуры типа сфалерита, в которой содержится большая концентрация стехиометрических вакансий ( $\sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$ ). В результате наличия таких вакансий многие более сложные полупроводники, которые образуются с участием  $\text{A}_2^{\text{III}}\text{B}_3^{\text{VI}}$ , также радиационно стойкие, например, принадлежащее системе  $(\text{In}_2\text{Te}_3)_x-(\text{Hg}_3\text{Te}_3)_{1-x}$ , в том числе при  $x = 0.5$ , соединение  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  с запрещенной зоной  $E_g = 0.74$  эВ и собственным характером проводимости при комнатной температуре. Как показано в работе [5], после действия  $\gamma$ -излучения дозой  $D_\gamma = 2 \cdot 10^9 \text{ Р}$  от источника  $^{60}\text{Co}$  и потока реакторных нейтронов  $10^{16} \text{ см}^{-2}$  в температурных зависимостях сопротивления образцов  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  изменения не превышали ошибки измерений.

Данная работа посвящена исследованию влияния облучения электронами на электрофизические параметры кристаллов  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$ , выращенных методом Бриджмена из предварительно синтезированного вещества. Облучение образцов проводилось на импульсном ускорителе Микротрон МЗО в Отделе фотоядерных процессов Института электронной физики НАН Украины (г. Ужгород). Температура образцов поддерживалась на уровне 293 К. Энергия электронов составляла  $E_e = 18$  МэВ, доза  $D = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ .

Измерения температурных зависимостей электропроводности  $\sigma$  и коэффициента Холла  $R$  проводились на образцах с различной исходной концентрацией носителей заряда. Полученные типовые зависимости показаны на рис. 1 на примере двух образцов до и после облучения. Температурные зависимости электро-

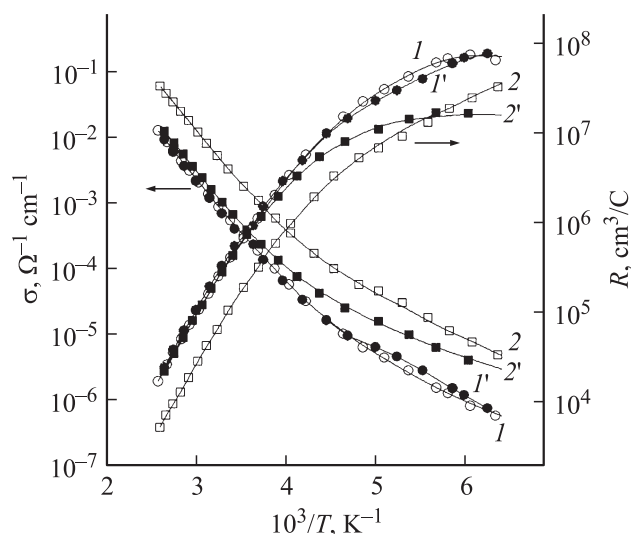


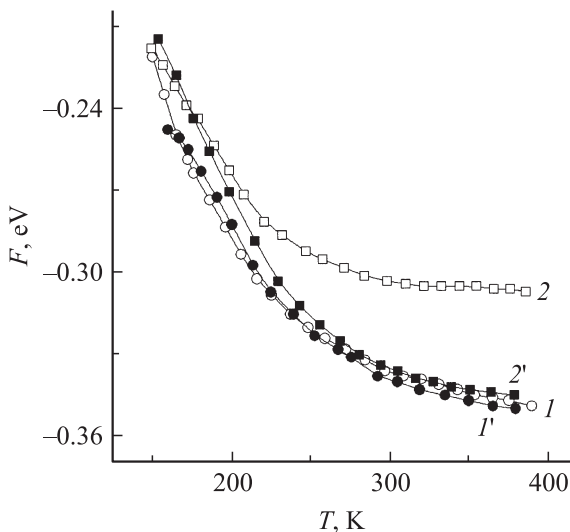
Рис. 1. Температурные зависимости электропроводности  $\sigma$  и коэффициента Холла  $R$  для двух образцов до (1, 2) и после (1', 2') облучения соответственно.

<sup>†</sup> E-mail: semicon-dpt@chnu.edu.ua

| № образца | $n$ ,<br>$\text{см}^{-3}$ | $n'$ ,<br>$\text{см}^{-3}$ | $R\sigma$ ,<br>$\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ | $R'\sigma'$ ,<br>$\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ |
|-----------|---------------------------|----------------------------|--|--|
| 1         | $1.7 \cdot 10^{13}$       | $1.6 \cdot 10^{13}$        | 230  | 230  |
| 2         | $6.3 \cdot 10^{13}$       | $1.8 \cdot 10^{13}$        | 354  | 297  |

проводности содержат два экспоненциальных участка. Высокотемпературный участок (260–390 К) характеризуется энергией активации  $0.36 \pm 0.01$  эВ, почти совпадающей с половиной ширины запрещенной зоны материала  $E_g/2 = 0.37$  эВ. С понижением температуры наблюдается уменьшение энергии активации, что связано с переходом к примесной проводимости, которую обеспечивает донорный уровень  $E_c - 0.25 \pm 0.01$  эВ [6]. Коэффициент Холла имеет отрицательный знак, так как подвижность электронов больше подвижности дырок ( $\mu_n/\mu_p = 8 \pm 2$ ). Концентрация носителей заряда ( $n, n'$ ), определенная из холловских измерений, и холловская подвижность ( $R\sigma, R'\sigma'$ ) при 300 К до и после облучения соответственно приведены в таблице ( $n, R\sigma$  — до,  $n', R'\sigma'$  — после облучения).

Наблюдается ослабление радиационного воздействия с уменьшением исходной концентрации носителей заряда, что объясняется различной первоначальной степенью компенсации. Более высокая исходная степень компенсации образца 1 подтверждается сравнительно низким значением подвижности носителей заряда. Как видно из табличных данных, после облучения имеет место тенденция уменьшения концентрации носителей заряда до величины  $n = (1.6-1.8) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  при 300 К. Соответствующие изменения электропроводности (рис. 1) и холловской подвижности свидетельствуют о том, что действие облучения электронами на образцы зависит от их исходных параметров и степени компенсации.



**Рис. 2.** Температурные зависимости энергии Ферми  $F$  для двух образцов до (1, 2) и после (1', 2') облучения соответственно.

В почти полностью компенсированном образце 1 изменения параметров незначительны. В образце 2 с большей холловской подвижностью и меньшей степенью компенсации изменения электрофизических свойств более существенны, особенно в интервале температур 160–260 К.

Положение уровня Ферми в исследованных образцах до и после облучения показано на рис. 2. Энергия уровня Ферми оценивалась с использованием выражения  $F = E_c - kT \ln(N_c/n)$ . При расчетах для эффективной плотности состояний в зоне проводимости  $N_c$  использовались данные работы [7]. Как видно из рис. 2, в результате облучения уровень Ферми образца 2 понижается, а при температурах, соответствующих собственной проводимости (260–390 К), приближается к середине запрещенной зоны и закрепляется в фиксированной области энергий  $E_c - (0.33-0.35)$  эВ. Если в исходном материале уровень Ферми уже занимает указанное положение (рис. 2, кривая 1), то облучение практически не влияет на его электрофизические параметры (рис. 1, 2, кривые 1'). При меньшей исходной глубине уровня Ферми (рис. 2, кривая 2) наблюдается компенсирующее действие облучения с последующим углублением и закреплением уровня Ферми (рис. 2, кривая 2') в положении, характерном для компенсированного материала.

Таким образом, эффективность облучения электронами образцов  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  определяется начальным положением уровня Ферми в запрещенной зоне относительно его фиксированного положения. При их совпадении влияние облучения на электрофизические параметры является минимальным.

В соответствии с существующими моделями [2] фиксация уровня Ферми под действием облучения является результатом взаимной компенсации радиационных дефектов донорного и акцепторного типов. Аналогично при облучении высокоэнергетическими электронами проявляется эффект „самокомпенсации“ введенных радиационных дефектов, подобный тому, который имеет место при введении примесей в  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  [8]. Электрическая неактивность радиационных и примесных дефектов и соответствующий эффект радиационной стойкости [9] являются характерной особенностью полупроводников со стехиометрическими вакансиями, плотность которых значительно превышает количество введенных дефектов. Благодаря свойствам прикладного значения полупроводник  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  является подходящим базовым материалом для радиационно стойких приборов: терморезисторов [5], оптических фильтров [10], фотоприемников [11,12], детекторов ионизирующих излучений [13] и др.

## Список литературы

- [1] А.А. Лебедев, А.М. Иванов, Н.Б. Строкан. ФТП, **38** (2), 129 (2004).
- [2] В.Н. Брудный, С.Н. Гриняев, Н.Г. Колин. ФТП, **37** (5), 557 (2003).
- [3] Н.Г. Колин. Изв. вузов, **46** (6), 12 (2003).

- [4] Л.П. Гальчинецкий, В.М. Кошкин, В.М. Кумаков и др. ФТТ, **14** (2), 646 (1972).
- [5] В.Л. Бакуменко, А.К. Бонаков, Г.Г. Грушка. Электрон. техн. Материалы, **2** (175), 75 (1983).
- [6] Г.Г. Грушка, Н.П. Гавалешко, З.М. Грушка, В.В. Буковей. Неорг. матер., **27** (1), 154 (1991).
- [7] Г.Г. Грушка, З.М. Грушка, Н.П. Гавалешко. Укр. физ. журн., **30** (2), 304 (1985).
- [8] О.Г. Грушка, П.Н. Горлей. Перспективные материалы, **6**, 33 (2003).
- [9] В.М. Кошкин, Ю.Н. Дмитриев, Ю.Р. Забродский и др. ФТП, **18** (8), 1373 (1984).
- [10] Г.Г. Грушка, Н.П. Гавалешко, З.М. Грушка, М.А. Валидов. А.с. СССР № 1572260 (1990).
- [11] А.И. Малик, Г.Г. Грушка, Н.П. Тевс. ЖТФ, **60** (6), 146 (1990).
- [12] А.И. Малик, Г.Г. Грушка. ЖТФ, **60** (10), 188 (1990).
- [13] В.Л. Бакуменко, А.К. Бонаков, Г.Г. Грушка, Л.И. Соболева. Электрон. техн. Материалы, **1** (174), 79 (1983).

Редактор Т.А. Полянская

## The electron irradiation effect on $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$ electrophysical parameters

*O.G. Grushka, V.T. Maslyuk\*, S.M. Chupyra, O.M. Mysliuk, S.V. Bilichuk, I.I. Zabolotskiy*

Chernovtsy National University,  
58012 Chernovtsy, Ukraine

\* Institute of Electron Physics  
of Ukrainian National Academy of Science,  
88016 Uzhgorod, Ukraine

**Abstract** The effect of electron irradiation with the energy  $E_e = 18 \text{ MeV}$  and the doze of irradiation —  $D = 4 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  on electrophysical properties of  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  crystals has been investigated. It was shown that after irradiation  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  samples have charge carrier concentration of  $(1.6-1.8) \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  independently of initial material concentration. The stabilization of Fermi level has been observed in irradiated material. The initial charge carrier concentration, which is mainly constant after irradiation and provides high irradiation resistance of  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  crystals, corresponds to compensated material similar to intrinsic semiconductor at  $T > 260 \text{ K}$ .