

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
ЭЛЕМЕНТЫ И СИСТЕМЫ

УДК. 621.315.592

ПОДВИЖНОСТЬ НЕОСНОВНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА
В ПЛЕНКАХ p -КРТ, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ
МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ
И ЛЕГИРУЕМЫХ МЫШЬЯКОМ *in situ* *Д. Ю. Протасов¹, С. А. Дворецкий¹, В. Я. Костюченко², В. С. Крылов²,
Н. Н. Михайлов¹, Р. Н. Смирнов¹¹Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск
E-mail: protasov@thermo.isp.nsc.ru²Сибирская государственная геодезическая академия, г. Новосибирск

Проведено исследование температурных зависимостей коэффициента Холла и магнитосопротивления гетероэпитаксиальных структур p - $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (КРТ) состава $X_{\text{CdTe}} = 0,22-0,23$, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках (013)GaAs. С помощью методов многозонной подгонки и «спектра подвижности» получены основные электрофизические параметры: концентрация и подвижность электронов и дырок. Определено, что при температурах 125–165 К подвижность электронов в легированном мышьяком p - $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ в 1,5–2 раза меньше, чем в p - $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, проводимость которого определяется вакансиями ртути. Однако за счет более высокого времени жизни длина диффузии электронов, рассчитанная по формуле Эйнштейна, в легированном мышьяком p - $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ в 2–2,5 раза выше, чем в вакансионном. Уменьшение подвижности при легировании мышьяком, возможно, связано с появлением дополнительного механизма рассеяния на нейтральных атомах As и ростовых дефектах.

Введение. Твердые растворы $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (КРТ) широко используются для создания инфракрасных (ИК) фотоприемников (ФП) [1]. Для фотовольтаических матричных ИК ФП традиционно используют вакансионно-легированные образцы p -КРТ ($p = 5 \cdot 10^{15} - 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$), проводимость которых определяется вакансиями ртути [2]. Однако для улучшения термической стабильности и улучшения параметров ИК ФП проводится преднамеренное ле-

* Работа выполнена при частичной поддержке интеграционного проекта СО РАН № 3.20.

гирование КРТ примесями I (золото, медь) и V (мышьяк) групп [3]. Легирование мышьяком более предпочтительно вследствие его низкой диффузии и низкой температуры выращивания методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), что дает возможность получения сложных многослойных структур с резким изменением типа проводимости слоев.

Электрофизические характеристики основных носителей заряда p -КРТ, легированных мышьяком, изучались в работах [4–6]. Время жизни в таком материале на 1–2 порядка выше, чем в вакансионном p -КРТ. Для получения ИК ФП с предельными характеристиками необходим материал p -КРТ, в котором диффузионная длина неосновных носителей имеет большую величину (десятки микрон и более). Диффузионная длина определяется в соответствии с соотношением Эйнштейна

$$L = \sqrt{\frac{kT}{e}} \mu \tau,$$

где μ – подвижность электронов (неосновных носителей заряда) в p -КРТ; τ – время жизни.

Изучение подвижности неосновных носителей заряда в вакансионном p -КРТ было проведено в [7]. Показано, что для исследованных образцов подвижность электронов при температуре 77 К лежит в диапазоне $5–8 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Температурная зависимость подвижности описывается как T^{-m} , где $m = 1,3–1,5$. Наряду с характерными значениями времени жизни (наносекунды) для такого материала диффузионная длина носителей составляет 15–20 мкм. Для образцов МЛЭ p -КРТ, легированных мышьяком, подвижность электронов до настоящего времени не определялась.

В данной работе впервые проведены исследования подвижности электронов легированных мышьяком гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) p -КРТ, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии с помощью измерений коэффициента Холла и магнитосопротивления при разных температурах.

Определение подвижности носителей заряда. Гетероэпитаксиальные структуры КРТ на подложках (013)GaAs с буферным слоем CdZnTe были выращены методом МЛЭ на установке «Обь-М» [8, 9]. Постоянный состав фоточувствительного слоя $X_{\text{CdTe}} = 0,22–0,23$. Легирование мышьяком (в виде As_4 в молекулярном потоке) проводилось из эффузионного источника типа Кнудсена. Температура выращивания составляла 160–165 °С. ГЭС КРТ МЛЭ без предварительного легирования выращивались при температуре 180 °С.

После роста образцы ГЭС КРТ МЛЭ имели n -тип проводимости. Активация мышьяка в акцепторное состояние производилась путем последовательного двухстадийного отжига:

- отжиг при температуре 350 °С в течение 2 ч;
- отжиг при температуре 220 °С в течение 20 ч в атмосфере ртути.

Конверсия проводимости в образце ГЭС КРТ МЛЭ без преднамеренного легирования осуществлялась за счет введения вакансий ртути при термическом отжиге 200–210 °С в течение 24 ч.

Для измерений вырезались холловские структуры шириной 1,0–1,5 мм и длиной 8–13 мм. Исследуемые образцы закреплялись на сапфировой под-

ложке. Омические контакты были сделаны из индия и контролировались по измерениям вольт-амперных характеристик.

Образцам присвоены номера: 1 – легированный мышьяком образец, 2 – вакансионно-легированный образец.

Измерения зависимостей эффекта Холла от магнитного поля и магнито-сопротивления проводились в диапазоне температур 77–166 К до максимальных значений магнитного поля ~ 2 Тл.

Погрешность измеренных значений напряжения эффекта Холла и магнито-сопротивления не превышала 2 %.

Значения концентраций и подвижностей электронов и дырок были рассчитаны с помощью методов «спектра подвижности» [10] и многозонной подгонки [11].

В многозонной подгонке концентрации и подвижности носителей заряда находятся из сопоставления экспериментальных значений компонент тензора проводимости $\sigma_{xx}(B)$ и $\sigma_{xy}(B)$ (или коэффициента Холла $R(B)$ и магнито-проводимости $\sigma(B)$) с теоретическими зависимостями

$$\sigma_{xx}(B) = \sum_{i=1}^n \frac{en_i\mu_i}{1 + \mu_i^2 B^2};$$

$$\sigma_{xy}(B) = \sum_{i=1}^n \frac{S_i en_i\mu_i^2 B}{1 + \mu_i^2 B^2},$$
(1)

где n_i и μ_i – концентрация и подвижность i -го сорта носителей соответственно; $S_i = +1$ для дырок и $S_i = -1$ для электронов; e – заряд электрона. В выражении (1) опущена зависимость времени релаксации от энергии, так как при наличии двух и более типов носителей заряда изменения компонент тензора проводимости $\sigma_{xx}(B)$ и $\sigma_{xy}(B)$ в магнитном поле будут настолько велики, что эффектами, связанными с дисперсией времени релаксации, можно пренебречь [12].

В p -КРТ для описания гальваномагнитных эффектов необходимо учитывать три типа носителей: тяжелые и легкие дырки и электроны [13].

Собственная концентрация n_i находилась по формуле

$$n_i = \sqrt{pn}.$$
(2)

Теоретические значения собственной концентрации $n_i^{\text{теор}}$ (м^{-3}) рассчитывались по формуле [14]

$$n_i^{\text{теор}}(x, T) = (5,585 - 3,820x + 1,753 \cdot 10^{-3} T - 1,364 \cdot 10^{-3} xT) \times$$

$$\times 10^{20} E_g^{3/4} T^{3/2} \exp(-E_g/2kT),$$
(3)

где x – состав, T – температура.

Ширина запрещенной зоны (эВ) находилась из выражения [15]

$$E_g(x, T) = -0,302 + 1,930x + 5,350 \cdot 10^{-4} T(1 - 2x) - 0,810x^2 + 0,832x^3.$$
(4)

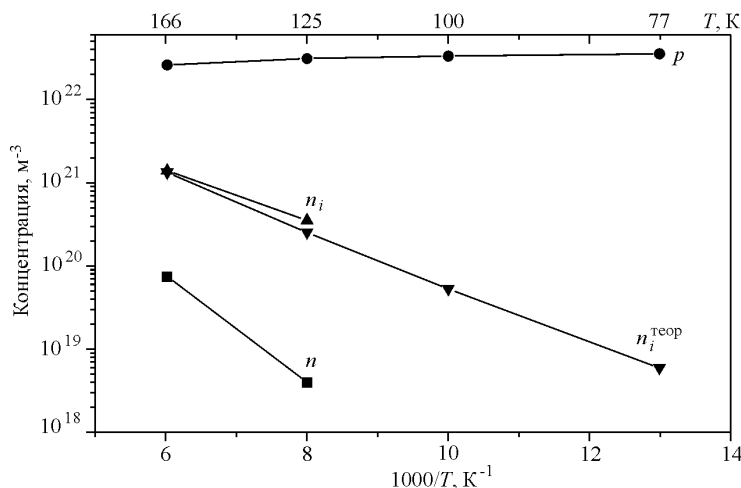


Рис. 1. Зависимости концентраций дырок p и электронов n от температуры. Рассчитанные значения собственной концентрации $n_i^{\text{теор}}$ сравниваются с экспериментально определенными

$$n_i = \sqrt{pn}$$

Экспериментальные результаты. На рис. 1 представлены температурные зависимости концентраций электронов n и дырок p для образца 1, определенных с помощью многозонной подгонки.

Как видно из рис. 1, концентрация дырок практически не изменяется от температуры в интервале 77–166 К и находится в пределах $(2-3) \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$. Концентрация электронов n уменьшается от $8 \cdot 10^{19}$ до $4 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ с понижением температуры от 166 до 125 К. В данной работе приводятся значения концентрации электронов, рассчитанные по измерениям эффекта Холла только при двух температурах. Это связано с тем, что концентрация электронов мала при более низких температурах и ее определение методом спектра подвижности из холловских измерений затруднено. Экспериментальные значения собственной концентрации n_i , определенные по формуле (2), близки к теоретическим, рассчитанным с помощью выражений (3) и (4). Это свидетельствует о высокой точности определения значений концентрации и подвижности носителей заряда из измерений методами спектра подвижности и многозонной подгонки.

На рис. 2 представлены результаты измерений подвижности электронов и дырок при разных температурах для двух образцов ГЭС КРТ МЛЭ.

Для температур, при которых проводились измерения, подвижность дырок лежит в интервале от 0,015 до 0,03 $\text{м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Подвижность электронов при температурах 125–166 К в образце 1 в 1,5–2 раза меньше, чем в образце 2. Для подтверждения этого результата на рис. 3 приведены магнитопольные зависимости коэффициентов Холла для образцов 1 и 2 при температуре 125 К.

При малом значении индукции магнитного поля знак коэффициента Холла отрицателен для обоих образцов, что свидетельствует о заметном вкладе в проводимость электронов. При увеличении магнитного поля коэффициент Холла возрастает, становится положительным и далее выходит на насыщение $(2-3) \cdot 10^{-4} \text{ Кл}^{-1} \cdot \text{м}^{-3}$.

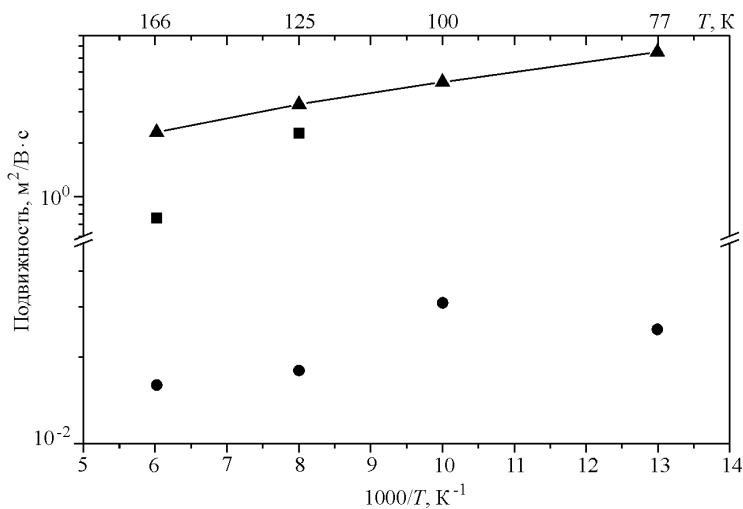


Рис. 2. Зависимости подвижности носителей заряда от температуры для легированного As (образец 1: ■ – μ_e , ● – μ_p) и легированного вакансиями Hg (образец 2, ▲ – μ_e)

Это свидетельствует об одинаковой концентрации дырок у образцов. В соответствии с (2) концентрация электронов должна быть одинаковой для обоих образцов. Однако при малом магнитном поле (до 0,7 Тл) коэффициент Холла для образца 1 существенно выше, чем для образца 2. Такое поведение можно объяснить только разницей в подвижностях электронов.

Уменьшение подвижности электронов в образце 1, легированном As, возможно, связано с дополнительным рассеянием носителей заряда на де-

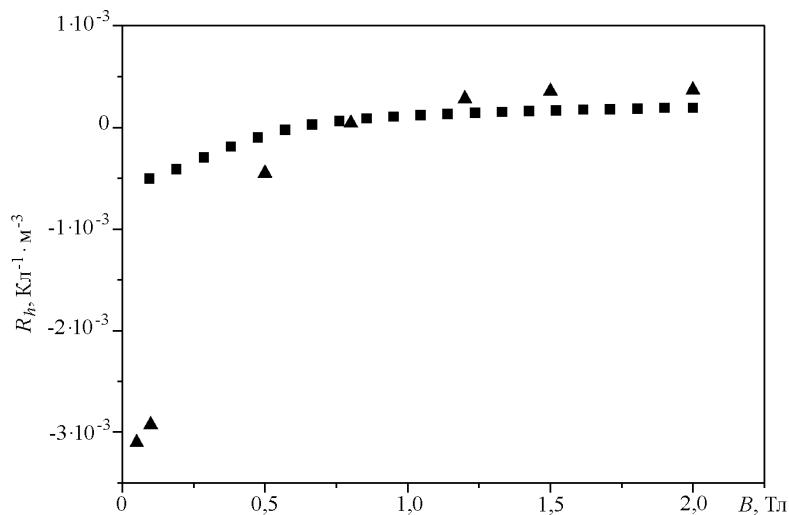


Рис. 3. Зависимости коэффициента Холла от магнитного поля для легированного As (■ – образец 1) и легированного вакансиями Hg (▲ – образец 2) при $T = 125$ К

фектах, концентрация и природа которых определяются более низкой температурой выращивания, чем в образце 2.

Длина диффузии для образцов 1 и 2 была определена из соотношения Эйнштейна. Время жизни для образца 1, измеренное по релаксации фотопроводимости методом СВЧ при 77 К, составляло 90 нс. Для образца 2 время жизни не превышало 10 нс. Более высокое значение времени жизни для образца 1 вызвано подавлением центров рекомбинации типа Шокли – Холла – Рида при легировании мышьяком [3]. Предполагая, что отношение между подвижностями электронов в образцах 1 и 2 при температуре 77 К такое же, как при $T = 125$ К (1,5–2 раза), получим длину диффузии 40–50 мкм в образце 1 и 21 мкм в образце 2.

Из приведенной оценки видно, что длина диффузии в образцах, легированных мышьяком, в 2–2,5 раза выше, чем в вакансионных образцах.

Заключение. Проведены исследования температурных зависимостей эффекта Холла и магнитосопротивления для ГЭС КРТ МЛЭ p -типа, проводимость которых определяется акцепторными центрами за счет внедрения мышьяка в теллуровую подрешетку или вакансиями ртути. Показано, что неосновные носители заряда (электроны) в легированном мышьяком ГЭС КРТ МЛЭ имеют более низкую подвижность, чем в вакансионном. Такая подвижность электронов обусловлена появлением дополнительного механизма рассеяния на нейтральных атомах As и ростовых дефектах. Для увеличения подвижности электронов в легированных мышьяком ГЭС КРТ МЛЭ необходимо повысить температуру выращивания или оптимизировать процессы роста при низких температурах. Диффузионная длина электронов в легированных мышьяком образцах в 2–2,5 раза больше, чем в вакансионно-легированных, что связано с более высоким временем жизни.

Авторы выражают благодарность В. С. Варавину за измерение времени жизни носителей заряда и проведение активационных отжигов образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рогальский А.** Инфракрасные детекторы. Новосибирск: Наука, 2003.
2. **Rogalsky A.** Analysis of the R_0A product in $n^+ - p$ $Hg_{1-x}Cd_xTe$ photodiodes // *Infrared Phys.* 1988. **28**. P. 139.
3. **Мынбаев К. Д., Иванов-Омский В. И.** Легирование эпитаксиальных слоев и гетероструктур на основе $HgCdTe$ (обзор) // *ФТП.* 2006. **40**. С. 3.
4. **Swartz C. H. et al.** Fundamental materials studies of Undoped, In-doped, and As-doped $HgCdTe$ // *Journ. Electr. Mater.* 2004. **33**, N 6. P. 728.
5. **Aqariden F., Shih H. D., Kinch M. A., Schaake H. F.** Electrical properties of low-arsenic-doped $HgCdTe$ grown by molecular beam epitaxy // *Appl. Phys. Lett.* 2001. **78**, N 22. P. 3481.
6. **Shi X. H., Rujirawat S., Ashokan R. et al.** Ionization energy of acceptors in As-doped $HgCdTe$ grown by molecular beam epitaxy // *Appl. Phys. Lett.* 1998. **73**, N 5. P. 638.
7. **Варавин В. С., Дворецкий С. А., Костюченко В. Я. и др.** Подвижность неосновных носителей заряда в пленках p - $HgCdTe$ // *ФТП.* 2004. **38**, вып. 5. С. 532.
8. **Сидоров Ю. Г., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н. и др.** Молекулярно-лучевая эпитаксия соединений $Cd_xHg_{1-x}Te$. Оборудование и технология // *Оптический журн.* 2000. **67**, № 1. С. 39.

9. **Сидоров Ю. Г., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н. и др.** Молекулярно-лучевая эпитаксия твердых растворов кадмий–ртуть–теллур на «альтернативных» подложках // ФТП. 2001. **35**, № 9. С. 1092.
10. **Beck W. A., Anderson J. R.** Determination of electrical transport properties using a novel magnetic field-dependent Hall technique // Journ. Appl. Phys. 1987. **62**, N 2. P. 541.
11. **Meyer J. R., Hoffman C. A., Bartoli F. J. et al.** Method for characterization of IR detector materials // Sem. Sci. Technol. 1993. **5**. P. 805.
12. **Блатт Ф.** Физика электронной проводимости в твердых телах. М.: Мир, 1971.
13. **Овсюк В. Н., Протасов Д. Ю., Талипов Н. Х.** Метод дифференциального магнитосопротивления для определения концентрации и подвижности электронов и легких дырок в $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ p -типа // Автометрия. 1998. № 5. С. 99.
14. **Hansen G. L., Schmit J. L.** Calculation of intrinsic carrier concentration in $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ // Journ. Appl. Phys. 1983. **54**. P. 1639.
15. **Hansen G. L., Schmit J. L., Casselman T. N.** Energy gap versus alloy composition and temperature in $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ // Journ. Appl. Phys. 1982. **53**. P. 7099.

Поступила в редакцию 24 апреля 2006 г.
