

# Исследование зависимости электрофизических параметров пленок $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ , выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, от уровня легирования индием

© В.С. Варавин<sup>¶</sup>, С.А. Дворецкий, Д.Г. Икусов, Н.Н. Михайлов,  
Ю.Г. Сидоров, Г.Ю. Сидоров, М.В. Якушев

Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук,  
630090 Новосибирск, Россия

(Получена 23 октября 2007 г. Принята к печати 6 ноября 2007 г.)

Исследованы зависимости времени жизни неосновных носителей заряда и подвижности электронов от уровня легирования индием в пленках  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ . Пленки с  $x \approx 0.22$  были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs и легированы индием в процессе роста по всей толщине. Исследованы температурные зависимости времени жизни в диапазоне температур 77–300 К. Уменьшение времени жизни с ростом уровня легирования определяется механизмом оже-рекомбинации. С увеличением уровня легирования наблюдается снижение подвижности, что качественно соответствует теоретическим расчетам.

PACS: 61.72.Vv, 72.80.Ey, 81.05.Dz, 81.15.Ni

## 1. Введение

Полупроводниковый материал  $\text{CdHgTe}$  (кадмий–ртуть–теллур, КРТ) является базовым для фокальных матричных фотоприемников в атмосферных окнах прозрачности 3–5 и 8–12 мкм. На его основе изготавливаются как фоторезисторные, так и фотодиодные инфракрасные фотоприемники. В настоящее время большой интерес представляют многослойные структуры КРТ со слоями разного типа проводимости, получаемые в процессе выращивания методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Такие структуры необходимы прежде всего для создания двухцветных и многоцветных приемников [1,2], а также при оптимизации структур для многоэлементных фотоприемников. Легирование в процессе роста позволяет также получать материал с высокой воспроизводимостью параметров и повышает их стабильность при внешних технологических воздействиях. Самой распространенной и изученной донорной примесью в КРТ является индий. Преимущества этой примеси заключаются в ее высокой электрической активности в КРТ при рабочих уровнях легирования (до  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ ), и считается, что индий не влияет на концентрацию собственных дефектов. Легирование индием широко используется в методе МЛЭ КРТ, при этом электрофизические свойства легированных пленок продолжают оставаться предметом исследований [3–5].

Цель данной работы заключается в исследовании электрофизических параметров легированных индием в процессе МЛЭ пленок КРТ на подложках GaAs (013) в зависимости от уровня легирования.

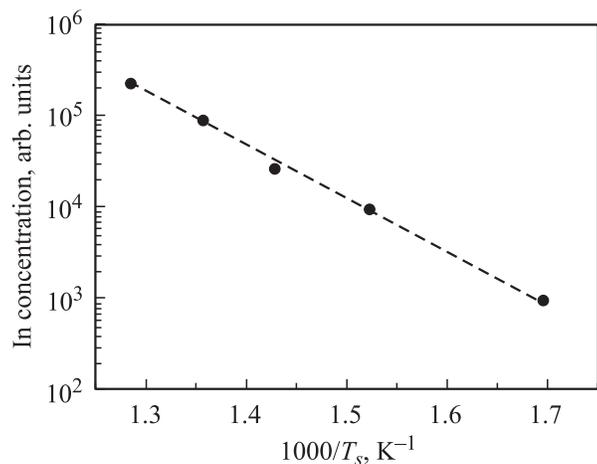
## 2. Экспериментальные результаты и обсуждение

Исследовались эпитаксиальные пленки  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  с  $x = 0.20–0.23$ , выращенные методом МЛЭ [6] на подложках GaAs (013). Толщина пленок составляла 8–12 мкм. На границах пленки выращивались варизонные слои с увеличением  $x$  до 0.5 к поверхности для снижения влияния поверхностной рекомбинации на время жизни неосновных носителей. Нелегированные пленки после роста имели  $n$ -тип проводимости и следующие параметры (при 77 К): концентрация электронов  $(2–4) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , подвижность  $80\,000–110\,000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  и время жизни 5–15 мкс.

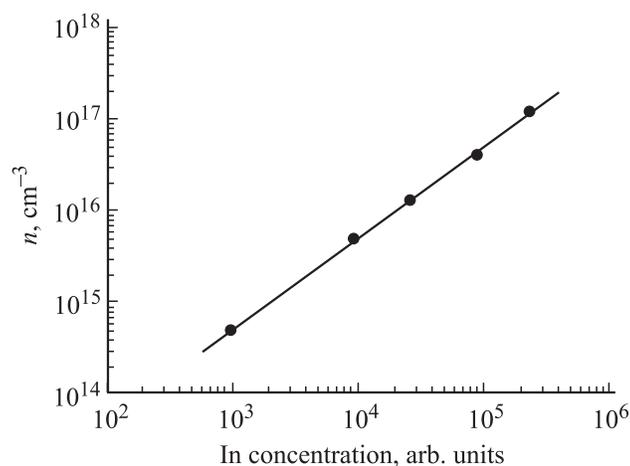
Легирование осуществлялось с помощью потока In из дополнительного источника типа Кнудсена, величина потока задавалась изменением температуры источника индия в диапазоне 320–510°C. Пленки легировались по всей толщине, при этом все режимы роста оставались такими же, как для нелегированных пленок. Нужно отметить, что после роста пленки не подвергались никакой дополнительной обработке.

Уровень легирования (в относительных единицах) в пленках определялся с помощью метода вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) на установке MAQ256 RIBER. Величина сигнала масс-спектрометра за вычетом фонового значения считалась прямо пропорциональной концентрации индия в образце. В процессе измерений проводилось травление пленок ионами кислорода на всю толщину. Было установлено, что концентрация индия не изменяется по толщине пленки, а ее зависимость от температуры источника индия  $T_s$  показана на рис. 1. Видно, что экспериментальные данные хорошо аппроксимируются экспоненциальной зависимостью от обратной температуры источника индия. Зависимость концентрации электронов  $n$  в пленках КРТ от относи-

<sup>¶</sup> E-mail: varavin@isp.nsc.ru



**Рис. 1.** Зависимость концентрации индия в пленках КРТ по данным ВИМС от обратной температуры источника индия. Точки — эксперимент, штриховая прямая — аппроксимация экспоненциальной зависимостью.



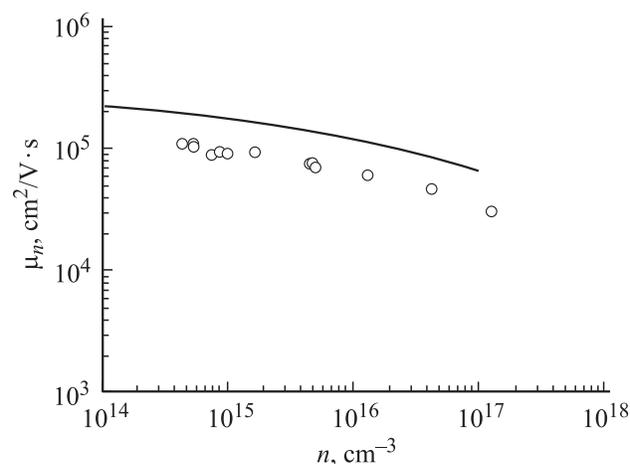
**Рис. 2.** Зависимость концентрации электронов  $n$  в пленках КРТ от относительного уровня легирования In по данным ВИМС. Точки — эксперимент, линия — аппроксимация линейной зависимостью.

тельного уровня легирования приведена на рис. 2. Концентрация электронов линейно растет с ростом уровня легирования. Это свидетельствует о том, что электрическая активность индия постоянна для исследованного диапазона легирования. По литературным данным [7,8], для этого диапазона она близка к 100%. Полученные результаты подтверждают возможность воспроизводимого получения пленок с заданной концентрацией электронов с помощью легирования индием в методе МЛЭ.

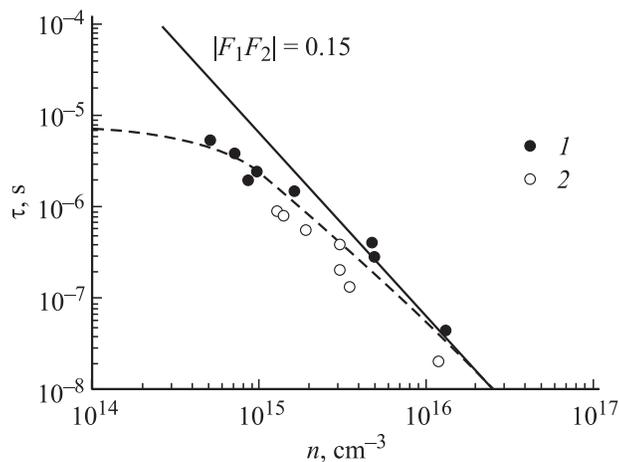
С увеличением уровня легирования наблюдается снижение подвижности электронов  $\mu_n$  в пленках. На рис. 3 показана зависимость подвижности от концентрации электронов в легированных пленках КРТ. Из литературы известно, что основными механизмами, определяющими подвижность электронов в КРТ при температурах вбли-

зи 77 К, являются рассеяние на ионизованных примесях и рассеяние на полярных оптических фононах [9–11]. На рис. 3 сплошной линией показан расчет из работы [9] с учетом этих механизмов. Видно, что экспериментальная зависимость качественно соответствует расчетной, при этом экспериментальные значения подвижности несколько ниже расчетных. В литературе также приводятся более низкие экспериментальные значения подвижности по сравнению с расчетом [9]. Возможными причинами такого расхождения считаются наличие неоднородностей, рассеяние на нейтральных точечных дефектах и наличие компенсации.

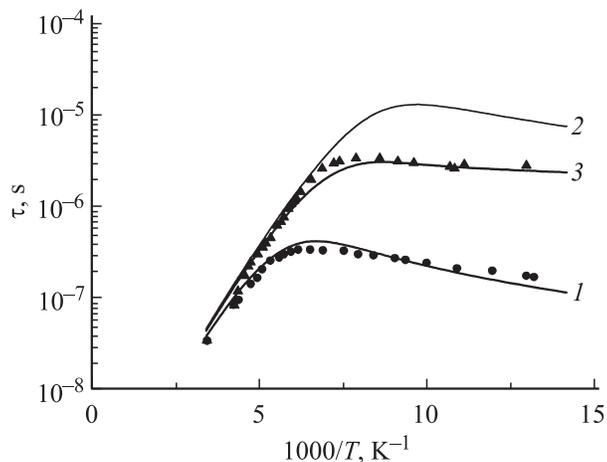
Еще одним важным параметром материала является время жизни неосновных носителей. На рис. 4 точками показана экспериментальная зависимость времени жизни  $\tau$  от концентрации электронов в легированных In пленках. Поскольку пленки имели на границах варизонные широкозонные слои, которые подавляют влияние поверхностной рекомбинации на время жизни, основными рекомбинационными механизмами будут рекомбинация Оже и рекомбинация Шокли–Рида [12]. Сплошной линией показан расчет времени жизни в соответствии с работой [12] для рекомбинации Оже при величине интеграла перекрытия  $|F_1 F_2| = 0.15$  и для состава с  $x = 0.22$ . Видно, что рекомбинация Оже преобладает при концентрациях выше  $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . При понижении концентрации становится заметным вклад рекомбинации Шокли–Рида. Штриховой линией на рис. 4 показан расчет времени жизни с учетом рекомбинации Оже и рекомбинации Шокли–Рида со следующими рекомбинационными параметрами:  $E_t = 0.06 \text{ мэВ}$ ,  $N_t = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $\sigma_n = 5 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$ ,  $\sigma_p = 5 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ , где  $E_t$  — энергетическое положение центров Шокли–Рида в запрещенной зоне, отсчитывается от потока валентной зоны,  $N_t$  — их концентрация,  $\sigma_n$  и  $\sigma_p$  — сечения захвата для электронов и дырок соответственно. Видно также, что эксперимен-



**Рис. 3.** Зависимость подвижности электронов  $\mu_n$  от их концентрации  $n$  при 77 К. Точки — эксперимент для легированных In пленок КРТ с  $x = 0.22$ – $0.23$ ; сплошная линия — расчет из работы [9] для КРТ с  $x = 0.225$ .



**Рис. 4.** Зависимость времени жизни  $\tau$  от концентрации носителей  $n$  для КРТ с  $x = 0.22–0.23$  при 77 К. Сплошная линия — расчет для механизма рекомбинации Оже при  $|F_1F_2| = 0.15$ , штриховая — расчет для совместного действия рекомбинации Оже и Шокли–Рида. 1 — эксперимент данной работы, 2 — экспериментальные значения из работы [5].



**Рис. 5.** Температурные зависимости времени жизни  $\tau$  в образцах КРТ с разным уровнем легирования индием  $N_d, \text{см}^{-3}$ : 1 —  $4 \cdot 10^{15}$ , 2, 3 —  $5 \cdot 10^{14}$ . Точки — эксперимент, сплошные кривые — расчет с учетом только рекомбинации Оже (1, 2) и с учетом рекомбинации Оже и Шокли–Рида (3).

тальные значения времени жизни хорошо согласуются с литературными данными из работы [5] для легированных индием пленок КРТ ( $x = 0.22$ ), выращенных методом МЛЭ на подложках CdZnTe.

В образцах с разным уровнем легирования были также исследованы температурные зависимости времени жизни  $\tau(T)$ , показанные на рис. 5. Видно, что экспериментальная зависимость для образца с концентрацией  $4 \cdot 10^{15} \text{см}^{-3}$  хорошо описывается механизмом рекомбинации Оже, а для образца с концентрацией  $5 \cdot 10^{14} \text{см}^{-3}$  в области низких температур необходимо учитывать совместное действие рекомбинации Оже и

Шокли–Рида. При расчете температурной зависимости для рекомбинации Шокли–Рида использовались те же параметры, что и при расчете зависимости времени жизни от концентрации электронов.

### 3. Заключение

При легировании индием в процессе выращивания пленок КРТ методом МЛЭ концентрация электронов в пленках (в диапазоне от  $5 \cdot 10^{14}$  до  $1.3 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3}$ ) прямо пропорциональна уровню легирования. Подвижность электронов уменьшается с ростом уровня легирования в соответствии с теоретическим расчетом, а величина подвижности несколько ниже расчетной.

Время жизни неосновных носителей при концентрации электронов  $> 3 \cdot 10^{15} \text{см}^{-3}$  в легированных индием образцах определяется механизмом рекомбинации Оже. В образцах с концентрацией  $\sim 5 \cdot 10^{14} \text{см}^{-3}$  в области низких температур время жизни определяется совместным действием рекомбинации Оже и Шокли–Рида и составляет 4–6 мкс.

По величине времени жизни легированные индием пленки КРТ МЛЭ на подложках GaAs не уступают пленкам КРТ МЛЭ на согласованных подложках CdZnTe.

### Список литературы

- [1] R.D. Rajavel, D.M. Jamba, J.E. Jensen, O.K. Wu, J.A. Wilson, J.L. Johnson, E.A. Patten, K. Kosai, P. Goetz, S.M. Jonson. *J. Cryst. Growth*, **184/185**, 1272 (1998).
- [2] L.A. Almeida, M. Thomas, W. Larsen, K. Spariosu, D.D. Edwall, J.D. Benson, W. Mason, A.J. Stoltz, J.H. Dinan. *J. Electron. Mater.*, **31** (7), 669 (2002).
- [3] H.R. Vydyanath, F. Aqariden, P.S. Wijewarnasuriya, S. Sivananthan, G. Chambers, L. Becker. *J. Electron. Mater.*, **27** (6), 504 (1998).
- [4] D.D. Edwall, R.E. De Wames, W.V. McLevige, J.G. Pasko, J.M. Arias. *J. Electron. Mater.*, **27** (6), 698 (1998).
- [5] P.S. Wijewarnasuriya, M.D. Lange, S. Sivananthan, J.P. Faurie. *J. Electron. Mater.*, **24** (5), 545 (1995).
- [6] Ю.Г. Сидоров, С.А. Дворецкий, В.С. Варавин, Н.Н. Михайлов, М.В. Якушев, И.В. Сабина. *ФТП*, **35** (9), 1092 (2001).
- [7] H.R. Vydyanath. *J. Cryst. Growth*, **161**, 64 (1996).
- [8] К.Д. Мынбаев, В.И. Иванов-Омский. *ФТП*, **35** (9), 1092 (2001).
- [9] M.C. Chen, L. Colombo. *J. Appl. Phys.*, **73** (6), 2916 (1992).
- [10] B. Gelmont, B. Lund, Kim Ki-Sang, G.U. Jensen, M. Shur, T.A. Fjedly. *J. Appl. Phys.*, **71** (10), 4977 (1992).
- [11] J.J. Dubowski, T. Dietl, W. Szymanska, R.R. Galazka. *J. Phys. Chem. Sol.*, **42** (5B), 351 (1981).
- [12] V.C. Lopes, A.J. Syllaios, M.C. Chen. *Semicond. Sci. Technol.*, **8**, 824 (1993).

Редактор Л.В. Шаронова

## Investigation of the dependence of $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ molecular beam epitaxy films electrical parameters on In doping level

V.S. Varavin, S.A. Dvoretzky, D.G. Ikusov,  
N.N. Mikhailov, Yu.G. Sidorov,  
G.Yu. Sidorov, M.V. Yakushev

Institute of Semiconductor Physics,  
Russian Academy of Sciences,  
Siberian Branch,  
630090 Novosibirsk, Russia

**Abstract** This paper investigates the dependencies of minority carrier lifetime and electron mobility on the In doping level in  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  epilayers. Films with  $x \approx 0.22$  were grown by molecular beam epitaxy on GaAs substrates, and were *in situ* In-doped throughout the thickness of a film. Temperature dependences of the minority carrier lifetime in the temperature range 77–300 K has also been investigated. The decrease of the lifetime with increase of the doping level is determined by the mechanism of Auger recombination. With increase of the doping level decrease of mobility is observed, which qualitatively corresponds to the theoretical calculations.