

Влияние низкотемпературного отжига на электрофизические параметры пленок n -CdHgTe

© П.А. Бахтин, С.А. Дворецкий, В.С. Варавин[†], А.П. Коробкин, Н.Н. Михайлов, И.В. Сабина, Ю.Г. Сидоров

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

(Получена 8 января 2004 г. Принята к печати 26 февраля 2004 г.)

Проведено исследование влияния низкотемпературного изотермического отжига на электрофизические параметры пленок $Cd_xHg_{1-x}Te$ (КРТ). Пленки с составом $x = 0.21-0.23$ и n -типа проводимости были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs. Отжиги проводились в интервале температур $90-230^\circ C$ и длительностью $1-1000$ ч. Изменения проводимости, коэффициента Холла и времени жизни неосновных носителей при отжиге объясняются образованием вакансий ртути и выходом атомов ртути из образца. Исследовано влияние различных защитных покрытий на скорость изменения электрофизических параметров пленок КРТ. Наиболее эффективным покрытием, стабилизирующим параметры пленок n -типа, оказался анодный оксид. Анализ зависимостей эффекта Холла и проводимости от магнитного поля показал, что наблюдаемые при отжиге изменения параметров можно описать в рамках двухслойной модели с двумя типами электронов: с высокой и низкой подвижностью.

1. Введение

Твердый раствор $Cd_xHg_{1-x}Te$ (КРТ), ширина запрещенной зоны которого может изменяться в широких пределах с помощью изменения состава, является основным материалом для производства инфракрасных фотоприемников на длины волн $3-5$ и $8-12$ мкм. Совершенствование технологии получения узкозонных полупроводников и разработка целого ряда конструкций фоторезисторов и фотодиодов позволили создать приборы высшего качества. Поэтому наряду с дальнейшим улучшением параметров приборов на первый план сейчас выдвигаются проблемы, связанные с их воспроизводимостью и стабильностью. Известно, что электрофизические параметры материала КРТ, в первую очередь концентрация носителей заряда и тип проводимости, изменяются при различных термообработках. Эти изменения связываются с испарением ртути с поверхности образца, что приводит к генерации вакансий, диффундирующих в глубь образца. Кроме того, окислительные процессы оказывают существенное влияние на электрофизические свойства поверхностных слоев полупроводника, что приводит к ухудшению параметров готовых приборов. Поэтому интенсивно разрабатываются методы создания диэлектрических покрытий для защиты поверхности узкозонных полупроводников. Для защиты приборов на основе КРТ наиболее широко используются сульфид цинка [1], теллурид кадмия [2] и анодный оксид (АО) [3].

Цель данной работы — исследование изменений электрофизических параметров пленок КРТ n -типа проводимости, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (пленки КРТ-МЛЭ), в зависимости от времени и температуры отжига, а также выяснение влияния защитных покрытий на скорость изменения параметров пленок КРТ-МЛЭ при низкотемпературном отжиге.

2. Результаты и обсуждение

В данной работе исследовались пленки КРТ, выращенные методом МЛЭ на подложках GaAs [4]. На подложках выращивались буферные слои CdTe толщиной $5-7$ мкм, а затем пленки КРТ, состоящие из рабочего слоя толщиной $8-10$ мкм с $x = 0.21-0.23$ и тонких ($0.5-1.5$ мкм) варизонных слоев у поверхности пленки с увеличением x до 0.5 к поверхности пленки. После выращивания пленки имеют проводимость электронного типа. На часть образцов были нанесены защитные слои анодного оксида (толщиной $0.025-0.1$ мкм), теллурида кадмия (толщиной $0.1-0.3$ мкм) и диэлектрика (толщиной 0.3 мкм). В качестве диэлектрика применялось многослойное покрытие, содержащее слои ZnS и CdTe и нанесенное с помощью напыления в вакууме. Анодный оксид наносился электрохимическим способом из электролита на основе KOH. Тонкие слои теллурида кадмия выращивались в едином процессе в конце роста пленки КРТ.

Отжиги при температурах $T_{\text{анн}} = 120-230^\circ C$ проводились в атмосфере гелия, а отжиг при $90^\circ C$ как в атмосфере гелия, так и на воздухе, что не оказало влияния на результаты отжигов. Измерения проводимости σ и коэффициента Холла R_H проводились методом Вандер-Пау при температуре 77 К в диапазоне магнитных полей $0-1$ Тл на образцах размером примерно 1×1 см².

Типичные изменения параметров пленок от времени отжига при $T_{\text{анн}} = 90^\circ C$ показаны на рис. 1-4. Эффективные значения концентрации ($1/|qR_H|$), где q — заряд электрона, и подвижности ($|\sigma R_H|$) определялись при величине магнитного поля $B = 0.05$ Тл. Образцы 1-3 были вырезаны из одной эпитаксиальной структуры (№ 1), образец 4 с покрытием CdTe — из другой (№ 2).

Видно, что во всех образцах, кроме образца с покрытием АО, происходит заметное уменьшение проводимости и эффективной подвижности с увеличением времени отжига. Сильнее всего проводимость уменьшается в

[†] E-mail: varavin@isp.nsc.ru

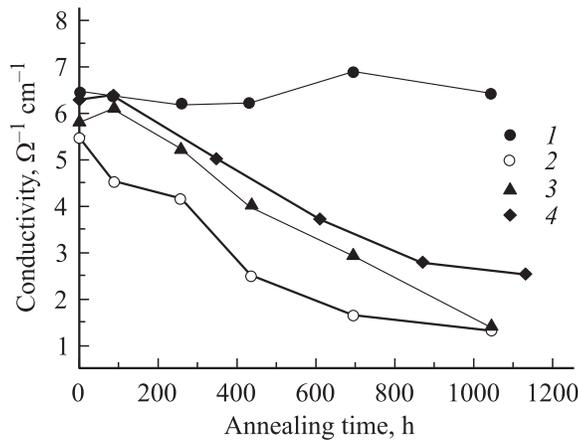


Рис. 1. Зависимости проводимости от времени отжига для образцов: 1 — с анодным оксидом, 2 — без покрытия, 3 — с диэлектриком, 4 — с CdTe. Образцы 1–3 вырезаны из эпитаксиальной структуры № 1, образец 4 — из структуры № 2. $T_{\text{ann}} = 90^\circ\text{C}$.

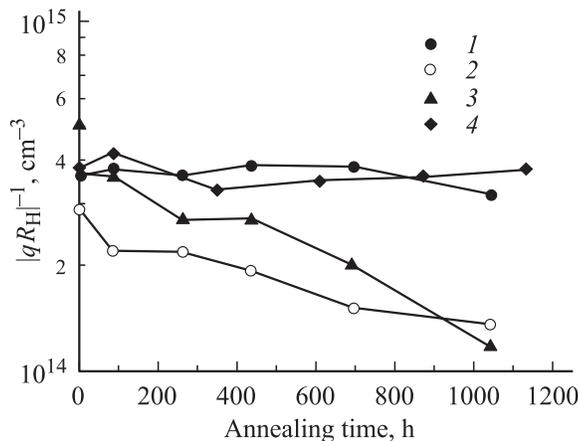


Рис. 2. Зависимости концентрации носителей (величины $1/|qR_H|$) от времени отжига. Символы 1–4 — то же, что и на рис. 1.

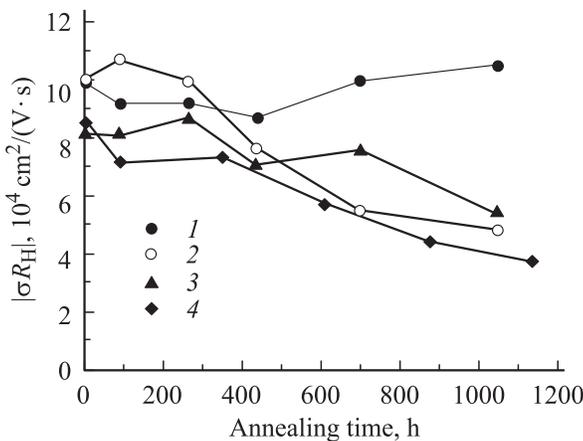


Рис. 3. Зависимости холловской подвижности ($|\sigma R_H|$) от времени отжига. Символы 1–4 — то же, что и на рис. 1.

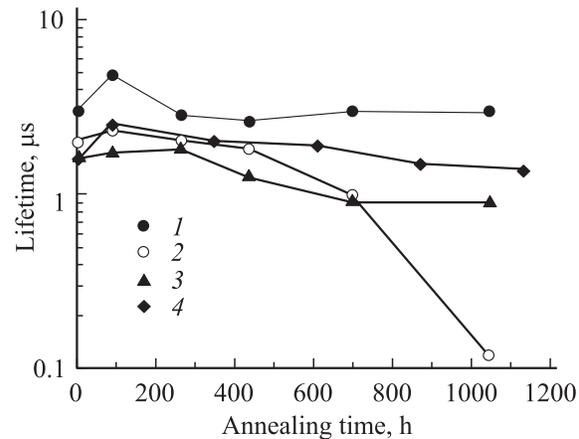


Рис. 4. Зависимости времени жизни несловных носителей заряда от времени отжига. Символы 1–4 — то же, что и на рис. 1.

образце без покрытия, а в меньшей степени — в образцах с диэлектриком и CdTe. Кроме того, для образцов без покрытия и с диэлектриком несколько снижается величина эффективной концентрации (рис. 2). Наименьшие изменения параметров наблюдаются в образцах с нанесенным анодным оксидом.

Параметры электронов	До отжига	После отжига
n_1, cm^{-3}	$2.2 \cdot 10^{14}$	$7.0 \cdot 10^{13}$
n_2, cm^{-3}	$4.2 \cdot 10^{14}$	$3.0 \cdot 10^{14}$
$\mu_1, \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{c})$	120000	120000
$\mu_2, \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{c})$	8000	6000

Примечание. n_1 и n_2 — концентрации электронов с высокой (μ_1) и низкой (μ_2) подвижностью. $T_{\text{ann}} = 90^\circ\text{C}$.

Для того чтобы выяснить причину наблюдаемых изменений параметров, дополнительно проводился анализ зависимостей проводимости и коэффициента Холла от магнитного поля с учетом нескольких типов носителей заряда в соответствии с работами [5–7]. Нами было показано, что в пленках КРТ-МЛЭ n -типа зависимости от магнитного поля можно объяснить присутствием двух типов электронов: с высокой (около $10^5 \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{c})$) и низкой (около $10^4 \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{c})$) подвижностью [8]. При этом анализ измерений при послойном травлении показал, что малоподвижные электроны локализованы в тонком (0.1–0.2 мкм) приграничном слое КРТ у гетероперехода. Используя данную двухслойную модель для описания зависимостей от магнитного поля B в образцах до и после отжига, были получены параметры двух типов электронов (см. таблицу), типичные для образцов без защитного покрытия. Подгонка расчетных зависимостей к экспериментальным данным осуществлялась так, чтобы получить максимальное соответствие одновременно для обеих зависимостей — $\sigma(B)$ и $R_H(B)$.

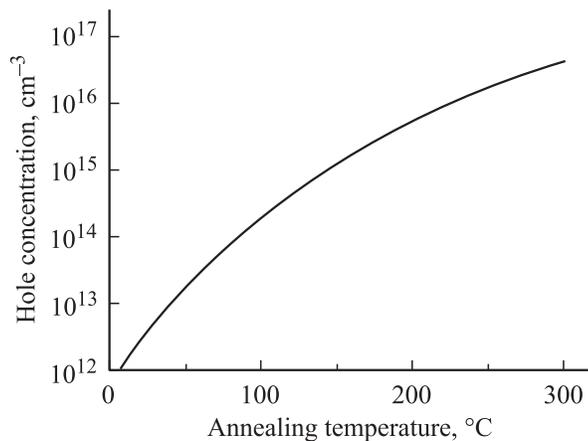


Рис. 5. Расчетная зависимость равновесной концентрации дырок от температуры отжига [9], экстраполированная в область низких температур.

Как видно из таблицы, подвижность высокоподвижных электронов не изменяется, а их концентрация в рабочем слое пленки снижается в несколько раз после отжига. Параметры низкоподвижных электронов в указанных режимах отжига изменяются незначительно. Это приводит к тому, что наблюдается уменьшение эффективной подвижности и проводимости образцов с увеличением времени отжига.

Уменьшение концентрации электронов с высокой подвижностью в рабочем слое пленки КРТ при отжигах обуславливается генерацией вакансий, которые компенсируют часть доноров в пленке. Общеизвестно, что вакансии ртути являются акцепторами и генерируются при повышении температуры за счет выхода атомов ртути из образца. По литературным данным, с вакансиями ртути также связывают рекомбинационные центры, которые снижают время жизни неосновных носителей в КРТ *p*-типа, полученном за счет введения вакансий. Отжиг в парах ртути приводит к заполнению вакансий.

Нами были проведены отжики образцов при температурах 200–230°C в инертной атмосфере и в присутствии паров ртути. Было установлено, что отжиг при температуре около 220°C в течение 24 ч в инертной атмосфере переводит образцы в *p*-тип с концентрацией дырок около $(8–20) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, а последующий отжиг в этом режиме в парах ртути позволяет обратимо получить *n*-тип проводимости. Такое поведение, как и наблюдаемые снижение проводимости и уменьшение времени жизни неосновных носителей в процессе отжига при 90°C обусловлены образованием вакансий ртути. На рис. 5 показана расчетная зависимость равновесной концентрации дырок (образованных вакансиями ртути) от температуры, экстраполированная до комнатной температуры, с использованием данных работы [9]. Экспериментальные значения концентрации дырок в наших образцах без защитного покрытия, отожженных при 220°C, хорошо соответствуют расчетным. Наблюдаемые изменения па-

раметров на рис. 1–3 и в таблице (отжиг при 90°C) можно объяснить с помощью двухслойной модели, если предположить, что концентрация дырок за счет генерации вакансий ртути составляет около $1.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Эта величина близка к расчетному значению (около 10^{14} см^{-3}). Близкие к этому значения получены также в расчетах [10]. Как видно из рис. 5, при комнатной температуре равновесная концентрация дырок за счет генерации вакансий мала (около $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$), что не может приводить к заметному изменению параметров исследованных пленок КРТ.

Наличие АО на поверхности образцов, как было показано выше, стабилизирует их электрофизические параметры при низкотемпературном отжиге (90°C). С помощью отжигов в диапазоне температур 140–160°C было установлено, что время начала изменения параметров пропорционально толщине АО, а скорость изменения параметров не зависит от толщины. Такое действие АО мы объясняем тем, что АО может являться резервуаром ртути, из которого она диффундирует в глубь образца и заполняет образующиеся при отжиге вакансии, а тонкие слои CdTe и диэлектрика лишь в некоторой степени замедляют выход атомов ртути из образца.

3. Заключение

Изменения параметров пленок КРТ-МЛЭ *n*-типа проводимости при низкотемпературном отжиге определяются уменьшением концентрации электронов с высокой подвижностью в основном слое пленки и наличием приповерхностного слоя у границы с буферным слоем CdTe. Приповерхностный слой имеет высокую концентрацию электронов с низкой подвижностью, и эти величины незначительно изменяются при низкотемпературном (90°C) отжиге. Уменьшение концентрации электронов с высокой подвижностью в основном слое пленки происходит за счет компенсации доноров вакансиями ртути, образующимися при отжиге за счет выхода атомов ртути из образца. При комнатной температуре этот процесс не должен приводить к изменению параметров материала.

Для стабилизации электрофизических параметров пленок КРТ *n*-типа при повышенных температурах наиболее эффективным защитным покрытием по сравнению с тонкими слоями CdTe и диэлектрика является анодный оксид.

Список литературы

- [1] W. Sang, J. Ju, W. Shi, Y. Qian. *J. Cryst. Growth*, **214/215**, 265 (2000).
- [2] I. Virt, M. Bilyk, I. Stefaniuk, M. Kuzma. *Sol. St. Electron.*, **45**, 1743 (2001).
- [3] O.P. Agnohotri, C.A. Musca, L. Faraone. *Semicond. Sci. Technol.*, **13**, 839 (1998).
- [4] Ю.Г. Сидоров, С.А. Дворецкий, В.С. Варавин, Н.Н. Михайлов, М.В. Якушев, И.В. Сабинина. *ФТП*, **35** (9), 1092 (2001).

- [5] E. Finkman, Y. Nemirovsky. *J. Appl. Phys.*, **53**(2), 1052 (1982).
- [6] M.B. Reine, K.R. Maschhoff, S.P. Tobin, P.W. Norton, J.A. Mroczkowski, E.E. Krueger. *Semicond. Sci. Technol.*, **8**, 788 (1993).
- [7] J.R. Meyer, C.A. Hoffman, F.J. Bartoli, D.A. Arnold, S. Sivanathan, J.P. Faurie. *Semicond. Sci. Technol.*, **8**, 805 (1993).
- [8] П.А. Бахтин, А.К. Гутаковский, С.А. Дворецкий, В.С. Варавин, А.П. Коробкин, Н.Н. Михайлов, И.В. Сабина, Ю.Г. Сидоров. *Тез. докл. конф. „Фотоника 2003“* (Новосибирск, 2003) с. 56.
- [9] G.L. Destafanis. *J. Cryst. Growth*, **86**, 700 (1988).
- [10] V.V. Bogoboyashchyu. *Proc. SPIE*, **5065**, 209 (2003).

Редактор Т.А. Полянская

Effect of low-temperature annealing on electrical parameters of n -CdHgTe

P.A. Bahtin, C.A. Dvoreckiy, V.S. Varavin, A.P. Korobkin, N.N. Mikhailov, I.V. Sabinina, J.G. Sidorov

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

Abstract Effect of a low-temperature annealing on electrical parameters of n -Cd _{x} Hg_{1- x} Te (MCT) films was investigated. These films with $x = 0.22$, and n -type conductivity have been grown by MBE on GaAs substrates. The annealing was carried out in the temperature range 90–230°C and in the range of time from 1 to 1000 h. Changes of conductivity, the Hall coefficient and minority carriers lifetime during annealing were explained by formation of mercury vacancies and by the exit of mercury atoms from films. Effect of various surface coating on the rate of varying electrical parameters MCT films was investigated. The most effective surface coating stabilizing n -type films parameters was anodic oxide. The analysis of Hall effect measurements in magnetic field has shown that observed variation of electrical parameters can be described with the help of the two-layer model and two types of electrons with high and low mobilities.