

Исследование поверхностного потенциала в области V-дефекта эпитаксиальной пленки МЛЭ КРТ

© В.А. Новиков[†], Д.В. Григорьев

Томский государственный университет,
634050 Томск, Россия

(Получена 8 апреля 2014 г. Принята к печати 3 июня 2014 г.)

Методами атомно-силовой микроскопии проведено исследование распределения контактной разности потенциалов (поверхностного потенциала) эпитаксиальных пленок $Cd_xHg_{1-x}Te$, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Изменение состава твердого раствора в области V-дефекта приводит к изменению величины контактной разности потенциалов. Показано, что в области V-дефекта состав твердого раствора изменяется на ~ 0.05 (2.5 ат.%) в сторону увеличения содержания ртути, а по периферии V-дефекта наблюдается область обеднения ртутью на 0.36 ат.%. Из анализа распределения поверхностного потенциала показано, что эпитаксиальная пленка КРТ, кроме макроскопических V-дефектов, содержит несформировавшиеся V-дефекты диаметром менее 1 мкм.

1. Введение

Тройные полупроводниковые соединения $Cd_xHg_{1-x}Te$ (КРТ), где состав материала x — мольное содержание Cd, являются одним из основных материалов для создания собственных фотоприемников ИК на диапазон длин волн 3–5 и 8–14 мкм [1]. Гетероэпитаксиальные пленки КРТ, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), являются наиболее перспективным материалом для создания многоэлементных фотоприемных устройств (МФПУ) инфракрасного излучения, обеспечивающих обработку сигнала непосредственно в фокальной области. Одной из главных задач при создании высокоэффективных МФПУ является получение высокой однородности чувствительных элементов матриц в фокальной плоскости. Следовательно, необходимо добиться высокой степени однородности состава и структурного совершенства эпитаксиальных пленок КРТ [2]. Как показано в работах [3–5], наибольшее влияние на однородность рабочих характеристик элементов матриц в фокальной плоскости оказывают V-дефекты. Данные дефекты формируются в процессе роста эпитаксиальных пленок на подложках с ориентацией, отличной от (111) и (100). Размер данных дефектов составляет 5–20 мкм. V-дефекты представляют собой поликристалл, размеры отдельных кристаллитов которого колеблются в пределах от 0.5 до 1.5 мкм, а высота — от 0.3 до 1.0 мкм [6].

В работах по исследованию состава тройного раствора в области V-дефекта показано, что данный дефект может содержать избыток ртути, кадмия или теллура. В работах [3,7] из рентгеноспектрального анализа сделан вывод о том, что в областях эпитаксиальной пленки с высокой концентрацией V-дефектов имеет место избыток теллура, достигающий до 3%. В тоже время экспериментальные данные, полученные методом электронно-зондового рентгеновского микроанализа, показывают, что в области V-дефектов наблюдается повышение содержания ртути на 6 ат.% [6]. Таким образом, определение состава

тройного раствора в области V-дефекта является достаточно актуальной проблемой.

2. Исследованные образцы и методика эксперимента

Для проведения исследований использовались гетероэпитаксиальные пленки КРТ p -типа проводимости, выращенные методом МЛЭ на подложках GaAs ориентации (013) с буферными слоями из ZnTe и CdTe [2]. Эпитаксиальные структуры выращивались в ИФП СО РАН г. Новосибирск. После выращивания пленки имели n -тип проводимости. Для конвертирования в p -тип их отжигали в нейтральной атмосфере водорода или гелия [2].

Исследования распределения поверхностного потенциала проводились методом зонда Кельвина (МЗК) на атомно-силовом микроскопе (АСМ) „Solver HV“ (производство NT-MDT, г. Зеленоград) при нормальных условиях. Использовались зонды на основе поликремния, легированного бором, покрытые платиной (тип зонда — NSG11/Pt, производства NT-MDT).

Метод зонда Кельвина представляет собой двухпроходной режим сканирования. На первом проходе производится измерение морфологии поверхности, после чего зонд отводится от поверхности образца на заданное расстояние (10–50 нм) и производит измерение контактной разности потенциалов (КРП) в каждой точке сканирования. Для определения КРП между острием иглы и образцом подаются постоянное и переменное напряжения. Измерения производятся на первой гармонике переменного смещения. В результате между поверхностью образца и острием иглы кантилевера возникает электрическая сила, которая зависит от емкости в зазоре острие зонда–поверхность образца, постоянного напряжения и индуцированного потенциала:

$$F(\omega) = -[V_{dc} - V_{cp} + V_{ind}]V_{ac} \sin(\omega t) \frac{dc}{dz}, \quad (1)$$

где V_{dc} — постоянное напряжение, подаваемое между зондом и образцом; V_{cp} — поверхностный потенциал;

[†] E-mail: novikovvadim@mail.ru

V_{ind} — индуцированный в приповерхностную область потенциал; $V_{ac} \sin(\omega t)$ — переменное смещение. Из выражения (1) видно, что поддерживая измеряемую силу равной нулю, величина поданного смещения будет равна $V_{dc} = V_{cp} - V_{\text{ind}}$, а так как материал не изменяется, то колебания КРП по поверхности образца будут связаны только с величиной V_{cp} , т.е. с изменением электрических свойств приповерхностной области эпитаксиальной пленки КРТ.

Изменение состава материала (x) на поверхности эпитаксиальной пленки приводит к изменению электронных свойств приповерхностной области. Следовательно, данное изменение можно зарегистрировать путем определения контактной разности потенциалов (поверхностного потенциала) методом зонда Кельвина. Данный метод находит широкое применение для исследования распределения встроенных [8] и внешних потенциалов в приборных микро- и наноструктурах [9–11]. Поэтому в данной работе метод МЗК применялся для исследования распределения поверхностного потенциала по поверхности эпитаксиальной пленки КРТ.

3. Результаты измерений

На рис. 1 приведены типичные АСМ-изображения морфологии поверхности и распределения КРП в области V -дефекта эпитаксиальной пленки $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$. Из рис. 1, b видно, что в области данного дефекта наблюдается увеличение КРП по отношению к основной матрице материала. Изменение КРП составляет ~ 70 мВ. По периферии V -дефекта наблюдается потенциальный ореол с незначительным (порядка 10 мВ) понижением величины КРП.

Как было сказано выше, изменение величины КРП определяется изменением поверхностного потенциала, который в свою очередь зависит от разности работ выхода зонда и образца [12]. Так как работа выхода твердого раствора определяется составом эпитаксиальной пленки КРТ, то изменение пространственного распределения поверхностного потенциала можно связать с изменением состава твердого раствора.

Работа выхода АСМ зонда в процессе измерения остается постоянной. Используя линейную аппроксимацию для работы выхода твердого раствора $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (работа выхода CdTe составляет 4.5 эВ, а HgTe — 5.9 эВ [13]), запишем выражение для изменения КРП в области V -дефекта в следующем виде:

$$\Delta CPD = V_{cp} - V_{\text{ind}} = \varphi_2 - \varphi_1 - V_{\text{ind}}, \quad (2)$$

считая, что V_{ind} не зависит от состава твердого раствора (данное предположение допустимо, так как колебания КРП малы, а состав твердого раствора изменяется незначительно), а работа выхода твердого раствора равна $\varphi_i = x_i \varphi_{\text{CdTe}} - (1 - x_i) \varphi_{\text{HgTe}}$, можно записать выражение для определения изменения состава твердого раствора

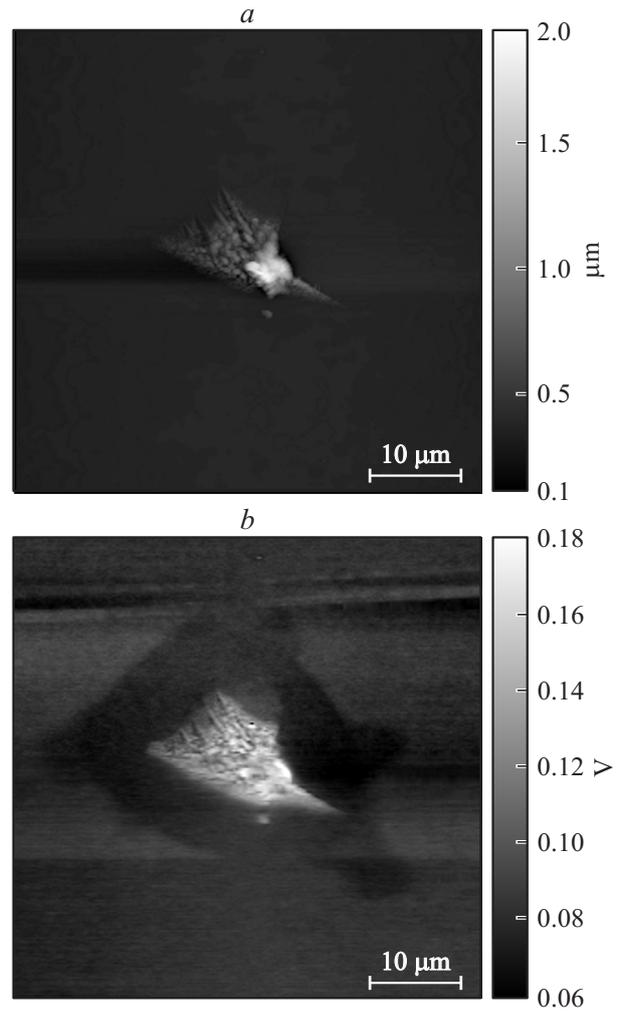


Рис. 1. a — АСМ изображение V -дефекта $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$; b — распределение КРП в области V -дефекта $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$.

КРТ в следующем виде:

$$x_2 = \frac{\Delta CPD}{\varphi_{\text{CdTe}} - \varphi_{\text{HgTe}}} + x_1. \quad (3)$$

Из анализа распределения КРП в области V -дефекта получили, что $\Delta CPD \approx 70$ мВ, тогда с учетом выражения (3) состав твердого раствора должен измениться на 0.05 в сторону увеличения содержания ртути, что хорошо совпадает с результатами, полученными в работе [6].

Потенциальный ореол с пониженной по величине КРП говорит об уменьшении содержания ртути в этой области ($|\Delta x| \approx 0.025 - 0.007$). Ширина области обеднения ртутью составляет порядка 10 мкм. Наблюдается локальное уширение потенциального ореола в области острых углов V -дефекта. Данное уширение, предположительно, связано с локальным увеличением оттока ртути для формирования кристаллитов V -дефекта.

На рис. 2 приведены данные АСМ измерений морфологии поверхности и распределения КРП вне об-

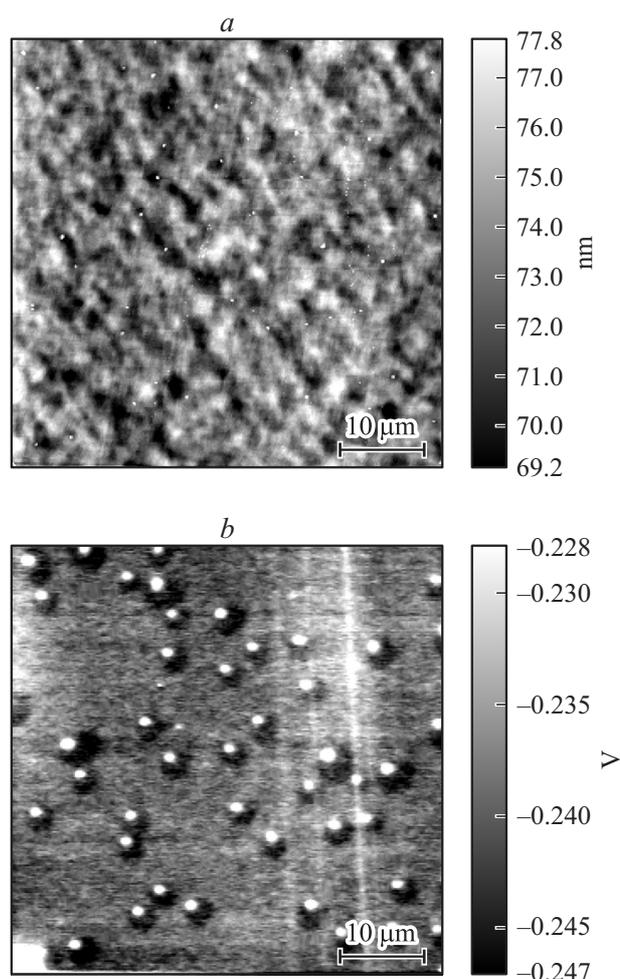


Рис. 2. *a* — АСМ изображение морфологии поверхности $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$; *b* — распределение КРП $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$.

ласти V-дефекта. Шероховатость поверхности при ширине области сканирования 50 мкм и количестве точек сканирования 256 составила 1.5 нм. На поверхности наблюдаются холмики высотой 5–10 нм и диаметром основания 0.5–1 мкм.

Из рис. 2, *b* видно, что для части этих холмиков распределение контактной разности потенциалов подобно распределению, наблюдаемому для V-дефектов, вплоть до наличия периферийной области, обедненной ртутью. Из сравнения распределения КРП в области V-дефекта и вне его можно сделать предположение, что эпитаксиальные пленки КРТ содержат не только макроскопические V-дефекты, но и несформировавшиеся V-дефекты круглой формы. Анализ распределения КРП показывает, что изменение состава в области несформировавшихся дефектов примерно в 2 раза меньше, чем в V-дефекте.

Из рис. 2, *b* также видно, что центры областей, обедненных ртутью, располагаются не по центру дефекта, а смещены в одном направлении. Данное смещение менее 1 мкм, поэтому его практически не видно на

распределении КРП в области V-дефекта. По нашему мнению, это связано с тем, что V-дефекты, а следовательно, и несформировавшиеся V-дефекты прорастают под углом 68.58° к плоскости (310) [14,15].

4. Заключение

В работе проведено исследование распределения КРП эпитаксиальных пленок $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, выращенных методом МЛЭ. Экспериментально показано, что в области V-дефектов наблюдается увеличение контактной разности потенциалов на величину порядка 70 мВ. По периферии V-дефекта наблюдается область с незначительным (порядка 10 мВ) понижением величины КРП, которая формирует потенциальный ореол. Показано, что изменения пространственного распределения КРП связаны с изменением локального состава материала эпитаксиальной пленки КРТ. Анализ полученных экспериментальных данных показал, что V-дефекты отличаются повышенным составом ртути, что хорошо совпадает с результатами, полученными в работе [6]. По периферии V-дефекта наблюдается область обеднения ртутью (потенциальный ореол), ширина которой составляет порядка 10 мкм. При этом наблюдается локальное уширение потенциального ореола в области острых углов V-дефекта. Данное уширение, предположительно, связано с локальным увеличением оттока ртути для формирования кристаллитов V-дефекта.

Исследование пространственного распределения поверхностного потенциала вне области V-дефекта показало наличие на поверхности материала дефектов диаметром менее 1 мкм, распределение контактной разности потенциалов которых подобно распределению, наблюдаемому для V-дефектов. Изменение состава в области несформировавшихся V-дефектов примерно в 2 раза меньше по сравнению с макроскопическими V-дефектами, однако их концентрация намного выше.

Авторы выражают благодарность Н.Н. Михайлову и В.С. Варавину за предоставление образцов эпитаксиальных пленок КРТ МЛЭ для исследований.

Работа выполнена в рамках Программы повышения конкурентоспособности Национального исследовательского Томского государственного университета.

Список литературы

- [1] А. Рогальский *Инфракрасные детекторы*, пер. с англ. под ред. А.В. Войцеховского. (Новосибирск, Наука, 2003).
- [2] В.Н. Овсюк, Г.Л. Курышев, Ю.Г. Сидоров и др. *Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона* (Новосибирск, Наука, 2001).
- [3] Ю.Г. Сидоров, С.А. Дворецкий, В.С. Варавин и др. *ФТП*, **35**, 1092 (2001).
- [4] I.V. Sabinina et al. *J. Cryst. Growth*, **117**, 238 (1992).
- [5] Е.В. Пермикина, А.С. Кашуба, И.А. Никифоров. *Успехи прикл. физики*, **1**, 510 (2013).

- [6] А.С. Кашуба, А.В. Заблоцкий, Е.В. Коростылев и др. Вестн. МИТХТ, **5**, 19 (2010).
- [7] С.Н. Якунин, Н.Н. Дремова. Письма ЖЭТФ, **87**, 580 (2008).
- [8] C.-S. Jiang, H.R. Moutihno, D.J. Friedman, J.F. Geisz, M.M. Al-Jassim. Appl. Phys. Lett., **93**, 10 035 (2003).
- [9] А.В. Анкудинов, А.Н. Титков, R. Laiho, В.А. Козлов. ФТП, **36**, 1138 (2002).
- [10] Doukkali, S. Ledain, C. Guasch, J. Bonnet. Appl. Surf. Sci., **235**, 507 (2004).
- [11] KI.-D. Katzer, W. Mertin, G. Vacher. Appl. Phys. Lett., **89**, 103 522 (2006).
- [12] Н.А. Торхов, В.А. Новиков. ФТП, **43**, 1109 (2009).
- [13] Zozime and C. Vermeulin. Rev. Phys. Appl., **23**, 1825 (1988).
- [14] I.V. Sabinina, A.K. Gutakovsky, Yu.G. Sidorov, A.V. Latyshev. J. Cryst. Growth, **274**, 339 (2005).
- [15] В.В. Арбенина, А.С. Кашуба, Е.В. Пермикина. Вестн. МИТХТ, **8**, 82 (2013).

Редактор Т.А. Полянская

Investigation of the surface potential in the V-defect epitaxial $Cd_xHg_{1-x}Te$

V.A. Novikov, D.V. Grigoriev

Tomsk State University,
634050 Tomsk, Russia

Abstract The was investigated the distribution of the contact potential difference (surface potential) epitaxial films $Cd_xHg_{1-x}Te$, grown by molecular beam epitaxy. Changes of composition of the solid solution in the area of V-defect leads to change in the value of the contact potential difference. It is shown that in the V-defect the composition of the solid solution is changed to -0.05 (2.5 atm.%) increasing the percentage Hg. On the periphery of V-defect observed depletion of Hg by 0.36 at.%. From the analysis of the surface potential shown that epitaxial film $Cd_xHg_{1-x}Te$ than as macroscopic V-defects contains unformed V-defects the diameter which less than 1 micron.