

УДК 538.971; 621.383

ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ НА ПЛОТНОСТЬ ЗАРЯДА НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЁНОК GdHgTe И Al_2O_3 , ВЫРАЩЕННОГО МЕТОДОМ АТОМНО-СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ

© Г. Ю. Сидоров, Д. В. Горшков, Ю. Г. Сидоров, И. В. Сабинина,
В. С. Варавин

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13
E-mail: george@isp.nsc.ru*

Исследовано влияние различных обработок поверхности плёнок $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ (КРТ) перед нанесением диэлектрика Al_2O_3 методом атомно-слоевого осаждения на величину заряда на границе раздела диэлектрик—полупроводник. Изготовлены структуры МДП с различной обработкой поверхности перед нанесением диэлектрика. Проведены измерения вольт-фарадных характеристик структур МДП на КРТ, и определена плотность поверхностного заряда. На поверхности плёнок состава $x = 0,22$ с естественным окислом поверхностный заряд распределён неоднородно и составляет $(0,8\text{--}1,8) \cdot 10^{-8}$ Кл/см², что может приводить к инверсии типа проводимости на поверхности. Выдержка структур КРТ в парах ртути при комнатной температуре приводит к формированию отрицательного заряда в диапазоне $-(0,4\text{--}1,6) \cdot 10^{-8}$ Кл/см².

Ключевые слова: кадмий—ртуть—теллур, оксид алюминия, молекулярно-лучевая эпитаксия, атомно-слоевое осаждение, фотодиоды, диэлектрик, пассивирующее покрытие, вольт-фарадные характеристики, структуры металл—диэлектрик—полупроводник, плотность поверхностного заряда.

DOI: 10.15372/AUT20200506

Введение. В тепловизионных системах широко используются фотоприёмные модули на базе охлаждаемых гибридных линейчатых или матричных инфракрасных (ИК) фотоприёмников (ФП) на основе КРТ [1]. Перспективным пассивирующим диэлектрическим покрытием для приборов на основе КРТ рассматривается оксид алюминия, наносимый методом атомно-слоевого осаждения (АСО) [2–6]. Одной из важнейших фотоэлектрических характеристик фотодиода, в значительной степени определяющей его фотоэлектрические параметры, является темновой ток фотодиода, который задаётся фундаментальными механизмами токопереноса и токами утечки. В работе [7] показано, что величину поверхностных токов утечки может на несколько порядков менять поверхностный потенциал, в [8], в частности, показано, что изгиб зон под действием поверхностного заряда может приводить к инверсии типа проводимости в приповерхностной области. Проведённые исследования фотодиодов на основе гетероэпитаксиальных структур $\text{GaAs}(\text{Si})/\text{ZnTe}/\text{CdTe}/\text{Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ с варизонными слоями также показали наличие токов утечек, величины которых зависели от обработок поверхности перед нанесением диэлектрического покрытия [9]. Таким образом, для минимизации величин токов утечки в приборах на основе КРТ необходимы как знания о величине встроенного заряда на границе раздела полупроводник—диэлектрик, так и о влиянии подготовки поверхности на неё.

Цель данной работы — исследование влияния обработок поверхности структур $\text{Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ p -типа на плотность поверхностного заряда на границе раздела с диэлектрической плёнкой Al_2O_3 , выращенной методом атомно-слоевого осаждения.

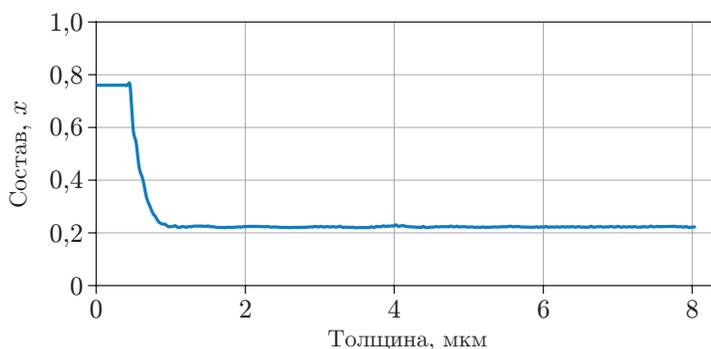


Рис. 1. Профиль состава плёнки КРТ ($x = 0,225$) по толщине

Эксперимент. Наиболее подходящим методом для определения плотности заряда на границе раздела является измерение вольт-фарадных характеристик (ВФХ) МДП-структур [10]. Структуры МДП изготавливались из эпитаксиальных плёнок КРТ p -типа, выращиваемых методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложках ориентации (310) из кремния. Использовались плёнки КРТ постоянного состава по толщине с составом $x \approx 0,2$, толщина отсчитывается от границы с буферным слоем CdTe, профиль состава указан на рис. 1.

Непосредственно после выращивания плёнки КРТ имели электронную проводимость, после чего подвергались отжигу в атмосфере гелия при $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ при минимальном давлении паров ртути, в результате за счёт введения вакансий ртути проводимость КРТ переводилась в дырочную. Концентрация носителей заряда определялась методом Холла после отжига и составляла величину $(6\text{--}10) \cdot 10^{15}\text{ см}^{-3}$.

Перед нанесением диэлектрика образцы КРТ подвергались разным воздействиям: травлению в бромистоводородном травителе, выдержке в парах ртути, окислению на воздухе.

В качестве диэлектрика использовались плёнки Al_2O_3 , выращиваемые методом АСО. Для металлического контакта структуры МДП применялся напыляемый в вакууме слой индия, на котором фотолитографией формировались круглые контактные площадки диаметром от 450 и 500 мкм. Зависимости плотности поверхностного заряда от размера МДП обнаружено не было.

Измерения ВФХ проводились зондовым методом на образце при температуре кипения жидкого азота при частотах тестирующего сигнала от 1 кГц до 1 МГц. Скорость развёртки напряжения смещения составляла 10 мВ/с. Для проведения измерений использовался анализатор параметров полупроводниковых приборов В1500А Agilent.

Исследования аналогичных объектов [2] не выявили ощутимого вклада разницы работ выхода металла и полупроводника $\Delta\varphi_{ms}$. Поэтому мы будем пренебрегать этой величиной.

Времена жизни неосновных носителей в вакансионно-легированном КРТ с $x = 0,22$ малы и составляют величину порядка 10 нс, что позволяет измерять поверхностный заряд высокочастотным методом не только в области обогащения, но и в областях обеднения и слабой инверсии.

Поскольку на исследованных образцах часто наблюдался гистерезис ВФХ, для уменьшения влияния гистерезиса и разделения вклада медленных и быстрых поверхностных состояний производилось измерение ёмкости в узких интервалах изменения напряжений [11]. Действительно, как это видно на рис. 2, гистерезис при измерении в интервале напряжений $-0,5 \dots +0,5\text{ В}$ оказывается небольшим (тонкие линии). Полагалось, что отсутствие гистерезиса в используемых интервалах частот тестирующего сигнала означает отсутствие вклада состояний с большими временами перезарядки.

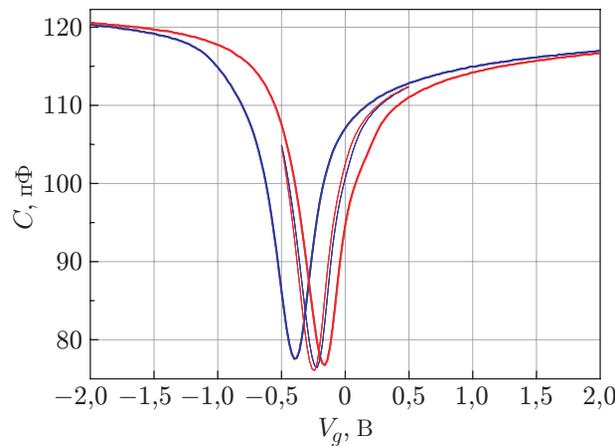


Рис. 2. Вольт-фарадные характеристики образца КРТ. Частота 1 кГц. Синие линии — увеличение напряжения, красные — уменьшение напряжения. Жирные линии — изменение напряжения от +5 В до -5 В, тонкие линии — изменение напряжения от +0,5 В до -0,5 В

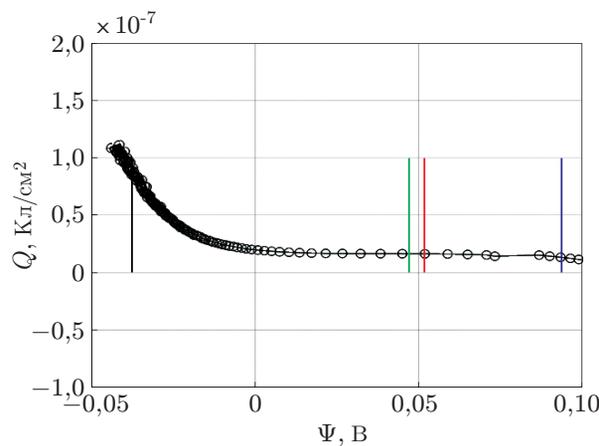


Рис. 3. Зависимость заряда поверхностных состояний Q от поверхностного потенциала Ψ , рассчитанная на основе ВФХ на рис. 2

Результаты и обсуждение. На рис. 2 показаны ВФХ образца КРТ, который не подвергался дополнительным обработкам перед нанесением диэлектрика. На поверхности КРТ при этом формируется тонкий слой собственного окисла, толщина которого согласно эллипсометрическим измерениям составляет около 2 нм. Рис. 3 иллюстрирует результаты расчётов поверхностного заряда для этого образца (напряжение плоских зон $-0,5$ В). Вертикальные линии на рис. 4 показывают положение краёв запрещённой зоны (чёрная линия — E_v , синяя — положение E_c), а также величину поверхностного потенциала, соответствующую собственному материалу E_i (зелёная линия). Красная линия отражает положение уровня Ферми на поверхности при $V_g = 0$.

Положение уровня Ферми на поверхности p -типа при более высоком поверхностном потенциале, чем в собственном КРТ, означает, что на поверхности имеет место инверсия типа проводимости. Описанный подход к обработке ВФХ можно применить для изучения неоднородности заряда на поверхности. Рис. 4 показывает результаты расчёта плотности поверхностного заряда для 71 структуры МДП при $V_g = 0$. Во всех обследованных точ-

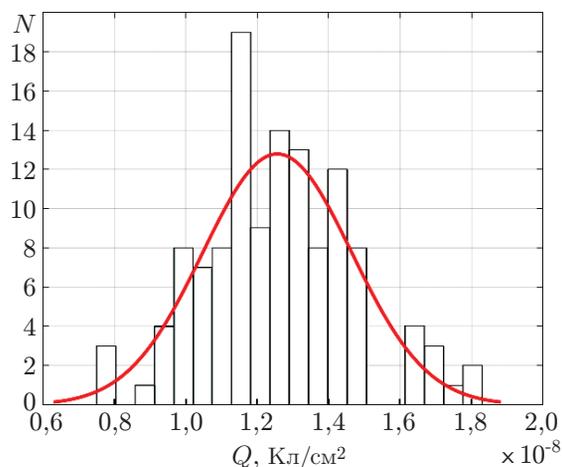


Рис. 4. Результаты расчёта плотности поверхностного заряда Q образца, измеренного для серии МДШ-структур при нулевом смещении для образца с естественным окислом

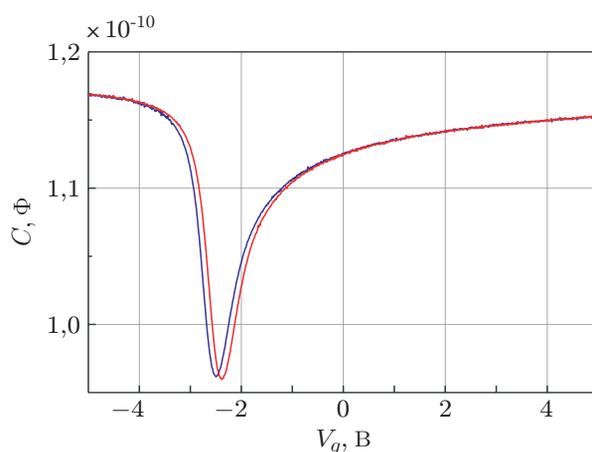


Рис. 5. Вольт-фарадная характеристика образца КРТ p -типа ($x = 0,223$, 10 кГц), подвергнутого химическому травлению в растворе Br_2/HBr . Синяя линия — напряжение менялось от -5 В до $+5$ В, красная — обратный проход

ках на поверхности присутствует инверсионный слой, что может приводить к появлению токов утечки в фотодиодах, изготовленных на основе данных структур. Видно, что донорные состояния, заряженные положительно, присутствуют по всей поверхности образца и их концентрация неоднородна по поверхности, что, в свою очередь, может влиять на неоднородность свойств фотодиодов.

Отдельный интерес представляет изучение влияния обработки КРТ в травителе Br_2/HBr , так как он часто применяется в технологии приборов на основе КРТ. Вольт-фарадная характеристика образца, подвергнутого травлению в Br_2/HBr перед нанесением диэлектрика, представлена на рис. 5.

Отрицательное значение напряжения плоских зон около -3 В означает наличие большого положительного заряда на поверхности на уровне $3 \cdot 10^{-7}$ Кл/см². Большой положительный заряд наблюдался также в работе [10] на поверхности КРТ с анодным окислом. Следует отметить, что влияние травления на величину поверхностного заряда имеет невоспроизводимый характер, в результате чего величина заряда на разных образцах варьируется почти на порядок.

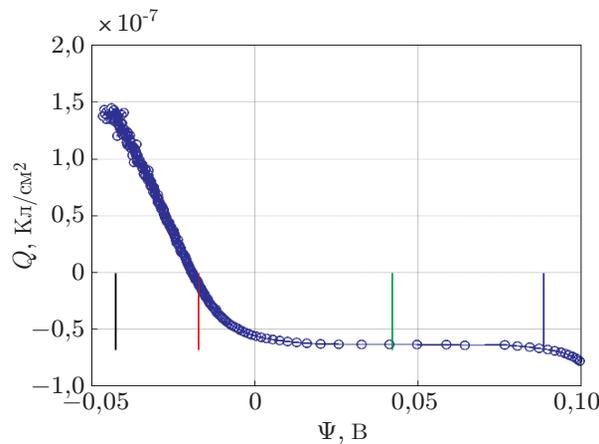


Рис. 6. Зависимость заряда поверхностных состояний Q от поверхностного потенциала для структуры МДП на базе КРТ с $x = 0,22$, выдержанной в парах ртути при комнатной температуре

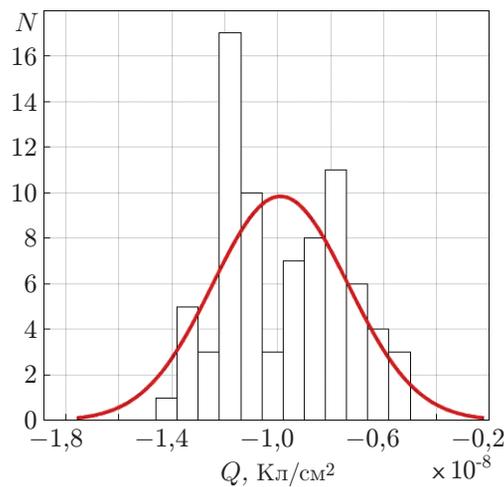


Рис. 7. Результаты расчёта плотности поверхностного заряда Q образца, измеренного для серии структур МДП при нулевом смещении для образца, обработанного в парах ртути

Выдержка образцов в парах ртути при комнатной температуре приводит к формированию отрицательного заряда на поверхности при нулевом смещении, соответствующего акцепторным поверхностным состояниям (рис. 6). Анализ большого числа структур МДП позволил определить разброс заряда по величине (рис. 7).

Вертикальные линии на рис. 6 обозначают то же, что и на рис. 4: чёрная линия — E_v , зелёная — положение E_i , красная — положение уровня Ферми на поверхности при $V_g = 0$, синяя — положение E_c .

Для технологии приборов на основе КРТ, в частности фотодиодов, представляет интерес оценка величины поверхностного заряда, требующегося для инверсии типа проводимости КРТ p -типа, что будет сделано в следующей работе наряду с исследованием темновых токов диодов на основе материала, подвергавшегося различным обработкам.

Заключение. Изучено влияние обработок поверхности на заряд на границе раздела КРТ — оксид алюминия. Для КРТ с естественным окислом поверхностный заряд на гра-

ниче раздела КРТ/ Al_2O_3 положителен и неоднороден по площади. Рассчитанные из ВФХ величины заряда лежат в диапазоне $(0,8-1,8) \cdot 10^{-8}$ Кл/см², чего достаточно для формирования на поверхности плёнки слоя n -типа проводимости. Травление КРТ в Br_2/HBr перед нанесением диэлектрика приводит к формированию большого положительного заряда на поверхности на уровне $3 \cdot 10^{-7}$ Кл/см². Выдержка структур КРТ в парах ртути при комнатной температуре приводит к формированию отрицательного поверхностного заряда с величинами $-(0,4-1,6) \cdot 10^{-8}$ Кл/см². Для определения влияния зарядов на границе раздела на токи утечки реальных фотодиодов, в том числе с варизонными структурами на поверхности, требуется проведение дополнительных исследований.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 18-72-00038).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Dvoretzky S. A., Varavin V. S., Mikhailov N. N. et al.** MWIR and LWIR detectors based on HgCdTe/CdZnTe/GaAs heterostructures // Proc. SPIE. 2005. **5964**. P. 75–87.
2. **Kovchavtsev A. P., Sidorov G. Yu., Nastovjak A. E. et al.** Mercury cadmium telluride surface passivation by the thin alumina film atomic-layer deposition // Journ. Appl. Phys. 2017. **121**, N 12. 125304.
3. **Zakirov E. R., Kesler V. G., Sidorov G. Y. et al.** XPS investigation of the ALD $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{HgCdTe}$ heterointerface // Semicond. Sci. Technol. 2019. **34**, N 6. P. 065007. DOI: 10.1088/1361-6641/ab1961.
4. **Zhang P., Ye Z.-H., Sun C.-H. et al.** Passivation effect of atomic layer deposition of Al_2O_3 film on HgCdTe infrared detectors // Journ. Electron. Mater. 2016. **45**, N 9. P. 4716–4720. DOI: 10.1007/s11664-016-4686-z.
5. **Voitsekhovskii A. V., Nesselov S. N., Dzyadukh S. M. et al.** Electrical characterizations of MIS structures based on variable-gap $n(p)$ -HgCdTe grown by MBE on Si(013) substrates // Infrared. Phys. & Technol. 2017. **87**. P. 129–133. URL: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2017.10.006> (дата обращения: 12.05.2020).
6. **Voitsekhovskii A. V., Nesselov S. N., Dzyadukh S. M.** Admittance measurements in the temperature range (8–77) K for characterization of MIS structures based on MBE $n\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ with and without graded-gap layers // Journ. Phys. Chem. Solids. 2017. **102**. P. 42–48. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2016.10.015> (дата обращения: 12.05.2020).
7. **He K., Zhou S.-M., Li Ya. et al.** Effect of surface fields on the dynamic resistance of planar HgCdTe mid-wavelength infrared photodiodes // Journ. Appl. Phys. 2015. **117**. 204501. DOI: 10.1063/1.4921593.
8. **Предеин А. В., Васильев В. В.** Особенности изгиба зон на поверхности варизонного $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ // Прикладная физика. 2011. № 5. С. 41–47.
9. **Сидоров Г. Ю., Горшков Д. В., Сабина И. В. и др.** Неоднородность темновых токов инфракрасных фотодиодов на основе $\text{Cd}_{0,22}\text{Hg}_{0,78}\text{Te}$ // Прикладная физика. 2019. № 3. С. 45–51.
10. **Lubzens D., Kolodny A., Yosi J.** Shacham-diamand. Automated measurement and analysis of MIS interfaces in narrow-bandgap semiconductors // IEEE Trans. Electron Devices. 1981. **28**, N 5. P. 546–551.
11. **Nakagawa T., Fujisada H.** Method of separating hysteresis effects from MIS capacitance measurements // Appl. Phys. Lett. 1977. **31**, N 5. P. 348–350. URL: <https://doi.org/10.1063/1.89695> (дата обращения: 12.05.2020).

Поступила в редакцию 12.05.2020

После доработки 03.07.2020

Принята к публикации 17.08.2020