

07.2;13.1

Влияние ростовой температуры на пассивирующие свойства пленок Al_2O_3 , выращенных методом атомно-слоевого осаждения на поверхности CdHgTe

© Д.В. Горшков, Г.Ю. Сидоров, И.В. Сабина, Ю.Г. Сидоров, Д.В. Марин, М.В. Якушев

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия
E-mail: GorshkovDV@isp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 20 апреля 2020 г.

В окончательной редакции 20 апреля 2020 г.

Принято к публикации 22 апреля 2020 г.

Экспериментально исследованы электрофизические свойства границы раздела пассивирующего покрытия Al_2O_3 , выращенного методом плазменно-индуцированного атомно-слоевого осаждения при различных температурах, и $p\text{-CdHgTe}$ ($x_{\text{CdTe}} = 0.22$), выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии, посредством измерения вольт-фарядных характеристик МДП-структур. Установлено, что при температуре выращивания Al_2O_3 , равной 200°C , в CdHgTe из-за диссоциации увеличивается концентрация акцепторов, а при температуре 80°C увеличивается разброс емкости диэлектрика и встроенного заряда. Оптимальная температура роста пассивирующего покрытия Al_2O_3 на CdHgTe лежит в диапазоне $120\text{--}160^\circ\text{C}$.

Ключевые слова: CdHgTe , Al_2O_3 , атомно-слоевое осаждение, вольт-фарядные характеристики, пассивирующее покрытие.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.15.49741.18347

Тройное соединение кадмий–ртуть–теллур (КРТ) активно применяется для создания фотоприемных устройств в инфракрасной области спектра, изучения топологических изоляторов, лазеров в инфракрасной области спектра и создания структур с двумерным электронным газом [1–3]. Важной задачей при создании устройств на основе КРТ является выбор пассивирующего покрытия. В работах, в которых исследовалась граница раздела гетероэпитаксиальных структур КРТ, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, и Al_2O_3 , нанесенного методом плазменно-индуцированного атомно-слоевого осаждения (ПАСО) при температуре образца 120°C , отмечается, что данный диэлектрик обладает хорошими пассивирующими свойствами [4–6]. Пассивирующие покрытия характеризуются рядом параметров: плотностью поверхностных состояний, однородностью и величиной встроенного заряда в диэлектрической пленке и др. При этом встроенный заряд в диэлектрике создает электрический потенциал на поверхности полупроводника, который в свою очередь может приводить как к обогащению, так и к обеднению приповерхностной области КРТ [7–9]. В работе [10] было показано, что неоднородность встроенного заряда в диэлектрическом покрытии приводит к неоднородности потенциала на поверхности КРТ и, как следствие, к неоднородности темновых токов фотодиодов фотоприемной матрицы. Встроенный заряд в диэлектрике зависит как от стехиометрии, так и от количества примесей в выращенной пленке. Стехиометрия и количество примесей в Al_2O_3 достигают оптимума при температурах $200\text{--}300^\circ\text{C}$, а толщина выращенного диэлектрика за один цикл (скорость роста) меняется незначительно [11].

С другой стороны, при нагреве КРТ в вакууме до температур выше 80°C с поверхности КРТ испаряется ртуть, что приводит к изменению состава приповерхностного слоя [12]. В литературе не встречается работ, в которых проводились исследования по поиску оптимальных параметров роста Al_2O_3 , выращенного методом ПАСО на КРТ. Цель настоящей работы — исследование параметров пассивирующих слоев Al_2O_3 ,

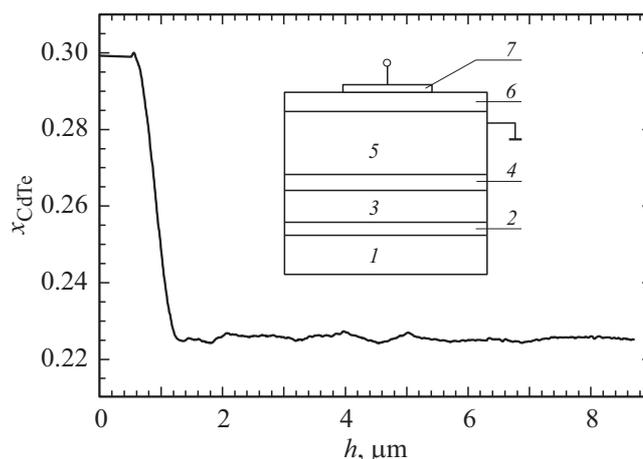


Рис. 1. Распределение состава по толщине пленки КРТ. На вставке схематически изображены исследуемые МДП-структуры: 1 — подложка Si; 2 — буферный слой из ZnTe толщиной $0.1\ \mu\text{m}$; 3 — буферный слой из CdTe толщиной $6.2\ \mu\text{m}$; 4 — варизонный слой с повышенным содержанием CdTe , уменьшающимся от $x_{\text{CdTe}} = 0.30$ до 0.22 ; 5 — рабочий слой HgCdTe с составом $x_{\text{CdTe}} = 0.22$; 6 — слой Al_2O_3 ; 7 — полевой электрод.

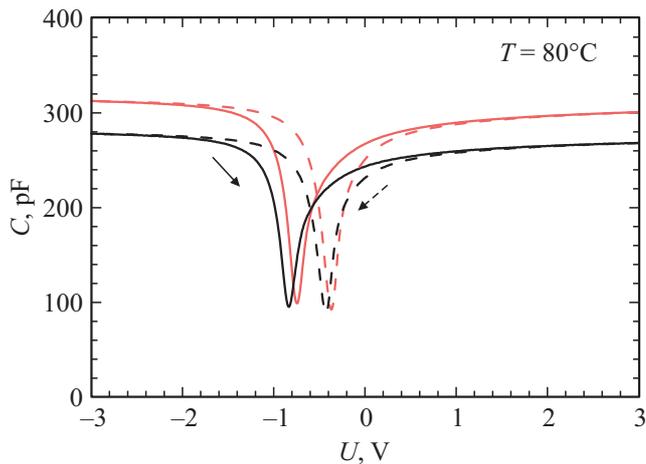


Рис. 2. Измеренные ВФХ при прямой (сплошные линии) и обратной (штриховые линии) развертке с одинаковыми площадями металлизации (0.2 mm^2) с диэлектриком, выращенным при температуре 80°C .

выращенных методом ПАСО на КРТ при различных температурах.

Эксперименты проводились на образцах гетероэпитаксиальных структур КРТ, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии [13] на подложке Si(013), с составом $x_{\text{CdTe}} = 0.22$, который контролировался в процессе роста автоматическим эллипсометром (рис. 1). В дальнейшем пластина отжигалась при минимальном давлении паров ртути для перевода пленки КРТ в вакансионный p -тип проводимости. Концентрация дырок и их подвижность после отжига были измерены методом Холла и составили $9.5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ и $370 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ соответственно. Поверхность образцов имела естественный окисел, дополнительных обработок поверхности не проводилось. Образцы, на которых выращивался пассивирующий слой Al_2O_3 , представляли собой кусочки одной пластины. Это позволяло минимизировать разброс объемных параметров образцов (таких как состав, концентрация носителей заряда, их подвижность и концентрация дефектов) с точностью до неоднородности пленки КРТ по площади пластины.

Нанесение диэлектрика Al_2O_3 проводилось методом ПАСО в камере FlexAl (Oxford Instruments). В качестве прекурсора использовался триметилалюминий. Температура образцов при росте диэлектрика составляла 80, 120, 160 и 200°C . Количество циклов нанесения Al_2O_3 на всех образцах было одинаковым и составляло 300. Толщина нанесенного диэлектрика контролировалась на спутнике из кремниевой пластины с помощью спектрального эллипсометра. На диэлектрик методом термического испарения наносились круглые металлические площадки различного диаметра (от 500 до $50 \mu\text{m}$), и измерялись вольт-фарадные характеристики (ВФХ) при температуре 77 K . Измерения ВФХ осуществлялись при помощи прибора B1500A фирмы Agilent. За

прямое направление развертки принималось изменение напряжения от отрицательного к положительному, а за обратное направление развертки — от положительного к отрицательному. На одном образце проводились измерения ВФХ не менее чем на 25 МДП-структурах (структурах металл–диэлектрик–полупроводник), что позволяло определять разброс параметров.

Толщины диэлектрика, измеренные на образцах-спутниках, составляли 413, 373, 350 и 330 \AA для температур роста $80, 120, 160$ и 200°C соответственно. Эти данные согласуются с данными, имеющимися в литературе [11].

На рис. 2 представлены характерные результаты измерения ВФХ для прямой и обратной развертки на МДП-структурах с одинаковыми площадями металлизации для образца, выращенного при температуре 80°C . Наблюдается разброс емкости МДП-структур при -3 V . Это напряжение соответствует режиму сильного обогащения; следовательно, наблюдается разброс емкости диэлектрической пленки Al_2O_3 . Данный разброс может быть вызван как неоднородностью диэлектрической проницаемости, так и неоднородностью толщины диэлектрика. Величины средней удельной емкости диэлектрика (C_i) и разброса удельной емкости по площади образца приведены в таблице. Следует отметить, что при измерении толщины диэлектрика Al_2O_3 на образце-спутнике площадь светового пятна эллипсометра составляет порядка 40 mm^2 , в то время как площадь самого большого металлического контакта МДП-структуры составляет 0.2 mm^2 . В связи с этим из эллипсометрических измерений получается усредненная по площади толщина пленки Al_2O_3 . Наблюдаемая неоднородность толщины или диэлектрической проницаемости пленки может быть обусловлена примесями, такими как углерод и водород, „замурованными“ в пленке в процессе роста, или избытком кислорода в пленке [11]. Описанные выше факторы могут влиять на неоднородность встроенного заряда в диэлектрике. Встроенный заряд приводит к смещению ВФХ как целого вдоль оси напряжения. О величине разброса встроенного заряда в диэлектрике можно судить по разбросу напряжения положения плоских зон (U_{fb}). Также на U_{fb} оказывает влияние заряд, захваченный на медленные ловушки в диэлектрике. На данных структурах заряд, захваченный на медленные ловушки, увеличивается с ростом приложенного к МДП-структуре напряжения. Для минимизации влияния захваченного заряда на медленных ловушках на U_{fb} данная величина определялась по ВФХ, измеренным в диапазоне от -1.0 до $+1.0 \text{ V}$. В указанном диапазоне напряжений величина гистерезиса существенно меньше, чем при измерении от -3.0 до $+3.0 \text{ V}$, а следовательно, меньше и влияние на положение U_{fb} заряда на ловушках в диэлектрике. Для образца с диэлектриком, выращенным при 200°C , при оценке положения U_{fb} использовалась концентрация акцепторов, как для других образцов, хотя это не совсем корректно, о чем будет сказано далее. Плотность медленных состояний на границе раздела

Параметры МДП-структуры, определенные исходя из измеренных ВФХ при 77 К

$T, ^\circ\text{C}$	$C_i, 10^{-7} \text{ F} \cdot \text{cm}^{-2}$	$C_{\text{min}}^{-1} - C_i^{-1}, 10^7 \text{ F}^{-1} \cdot \text{cm}^2$	U_{fb}, V	$\Delta U_{fb}, \text{V}$
80	1.48 ± 0.06	1.23 ± 0.05	-0.83 ± 0.08	0.38 ± 0.04
120	1.63 ± 0.01	1.23 ± 0.03	-0.28 ± 0.07	0.35 ± 0.06
160	1.87 ± 0.01	1.14 ± 0.04	-0.32 ± 0.07	0.49 ± 0.07
200	1.84 ± 0.01	0.40 ± 0.04	0.09 ± 0.11	0.49 ± 0.10

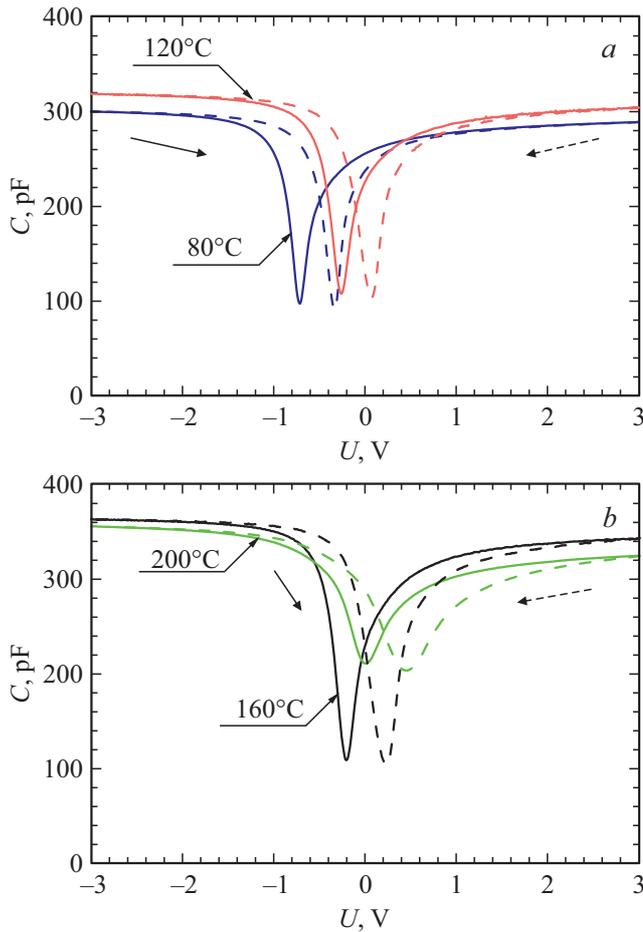


Рис. 3. Измеренные ВФХ при прямой (сплошные линии) и обратной (штриховые линии) развертке с одинаковыми площадями металлизации для различных температур роста диэлектрической пленки (указаны на рисунке).

можно охарактеризовать по разнице напряжений плоских зон в прямом и обратном направлениях (ΔU_{fb}) (по гистерезису ВФХ [14]). В таблице приведены значения ΔU_{fb} для интервала напряжений от -3 до $+3$ В.

Исходя из величины минимальной емкости можно определить концентрацию акцепторов в приповерхностной области [15]. Концентрация акцепторов, а следовательно, и вакансий ртути пропорциональна разности обратной минимальной емкости и обратной емкости диэлектрика ($C_{\text{min}}^{-1} - C_i^{-1}$). Отметим, что емкость в ми-

нимуме ВФХ также зависит от заряда в диэлектрике вблизи границы раздела, так как этот заряд может экранировать или усиливать электрическое поле, приложенное к металлическому затвору [14]. При этом заряд необязательно должен быть встроенным, это может быть заряд, захваченный глубокими ловушками в диэлектрике. На рис. 3 это явление хорошо видно по величине минимальной емкости при прямой и обратной развертке.

На рис. 3, *a* и *b* представлены характерные результаты измерения ВФХ на образцах с диэлектриком, выращенным при различных температурах. Наблюдается различие емкости диэлектрика, что в большей степени связано с различием толщины слоя Al_2O_3 . Для температур роста диэлектрического покрытия более 80°C не наблюдается большого разброса емкости диэлектрика. Полученные значения и величины разброса для емкости диэлектрика приведены в таблице. Также для температур роста более 80°C не наблюдается существенного разброса встроенного заряда. При этом величина встроенного заряда в диэлектрике уменьшается с увеличением температуры роста Al_2O_3 , о чем свидетельствует уменьшение напряжения плоских зон с ростом температуры. Это хорошо заметно на рис. 3 по сдвигу положения минимума ВФХ в сторону нулевого напряжения. Понижение величины встроенного заряда может быть вызвано уменьшением количества примесей на границе диэлектрика и КРТ, в самом диэлектрике и приближением состава диэлектрика к стехиометрическому с ростом температуры [11]. Для образца с диэлектриком, выращенным при 200°C , наблюдается увеличение минимальной емкости ВФХ по сравнению с таковой для других образцов. Наблюдаемое поведение свидетельствует об увеличении в приповерхностной области концентрации заряженных акцепторов, которыми являются вакансии ртути. При этом для образцов, выращенных при 200°C , наблюдается самый большой разброс по поверхности образца концентрации акцепторов.

В работе установлено, что изменение температуры роста Al_2O_3 влияет на встроенный заряд в диэлектрике. Наиболее вероятно, что данное явление объясняется изменением количества примесей в пленке, таких как углерод и водород, и избыточным количеством кислорода. Не исключено, что на величину встроенного заряда влияет исходное состояние поверхности образца. Для пассивирующего покрытия Al_2O_3 , выращенного при 80°C , наблюдается разброс емкости диэлектрика по тол-

щине, вызванный, по всей видимости, нестехиометрией и наличием примесей в пленке. Для диэлектрического покрытия, выращенного при 200°C, наблюдается увеличение концентрации акцепторов. Оптимальная температура роста пассивирующего покрытия Al₂O₃ на КРТ, обеспечивающая низкое значение напряжения плоских зон, соответственно низкую плотность встроенного заряда и минимальный разброс величины встроенного заряда, лежит в диапазоне 120–160°C.

Финансирование работы

Работа поддержана проектом РНФ-18-72-00038.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Galeeva A.V., Artamkin A.I., Kazakov A.S., Danilov S.N., Dvoretzkiy S.A., Mikhailov N.N., Ryabova L.I., Khokhlov D.R. // Beilstein J. Nanotechnol. 2018. V. 9. N 1. P. 1035–1039. DOI: 10.3762/bjnano.9.96
- [2] Aleshkin V.Y., Dubinov A.A., Rumyantsev V.V., Fadeev M.A., Domnina O.L., Mikhailov N.N., Dvoretzkiy S.A., Teppe F., Gavrilenko V.I., Morozov S.V. // J. Phys.: Condens. Matter. 2018. V. 30. N 49. P. 495301. DOI: 10.1088/1361-648X/aaebf5
- [3] Bazovkin V.M., Varavin V.S., Vasil'ev V.V., Glukhov A.V., Gorshkov D.V., Dvoretzkiy S.A., Kovchavtsev A.P., Makarov Y.S., Marin D.V., Mzhelskiy I.V., Polovinkin V.G., Remesnik V.G., Sabinina I.V., Sidorov Y.G., Sidorov G.Y., Stroganov A.S., Tsarenko A.V., Yakushev M.V., Latyshev A.V. // J. Commun. Technol. Electron. 2019. V. 64. N 9. P. 1011–1015. DOI: 10.1134/S1064226919090043
- [4] Zhang P., Ye Z.-H., Sun C.-H., Chen Y.-Y., Zhang T.-N., Chen X., Lin C., Ding R.-J., He L. // J. Electron. Mater. 2016. V. 45. N 9. P. 4716–4720. DOI: 10.1007/s11664-016-4686-z
- [5] Kovchavtsev A.P., Sidorov G.Y., Nastovjak A.E., Tsarenko A.V., Sabinina I.V., Vasilyev V.V. // J. Appl. Phys. 2017. V. 121. N 12. P. 125304. DOI: 10.1063/1.4978967
- [6] Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M. // J. Phys. Chem. Solids. 2017. V. 102. P. 42–48. DOI: 10.1016/j.jpcs.2016.10.015
- [7] He K., Zhou S.-M., Li Y., Wang X., Zhang P., Chen Y.-Y., Xie X.-H., Lin C., Ye Z.-H., Wang J.-X., Zhang Q.-Y. // J. Appl. Phys. 2015. V. 117. N 20. P. 204501. DOI: 10.1063/1.4921593
- [8] Предеин А.В., Васильев В.В. // Прикладная физика. 2011. № 5. С. 41–47.
- [9] Стучинский В.А., Вишняков А.В., Сидоров Г.Ю. // Автометрия. 2019. № 5. С. 40–47, DOI: 10.15372/AUT20190506
- [10] Сидоров Г.Ю., Горшков Д.В., Сабина И.В., Сидоров Ю.Г., Варавин В.С., Предеин А.В., Якушев М.В., Икусов Д.Г. // Прикладная физика. 2019. № 3. С. 45–52.
- [11] van Hemmen J.L., Heil S.B.S., Klootwijk J.H., Roozeboom F., Hodson C.J., van de Sanden M.C.M., Kessels W.M.M. // J. Electrochem. Soc. 2007. V. 154. N 7. P. G165. DOI: 10.1149/1.2737629
- [12] Zakirov E.R., Kesler V.G., Sidorov G.Y., Prosvirin I.P., Gutakovskiy A.K., Vdovin V.I. // Semicond. Sci. Technol. 2019. V. 34. N 6. P. 065007. DOI: 10.1088/1361-6641/ab1961
- [13] Izhnin I.I., Izhnin A.I., Savytskiy H.V., Vakiv M.M., Stakhira Y.M., Fitsych O.E., Yakushev M.V., Sorochkin A.V., Sabinina I.V., Dvoretzkiy S.A., Sidorov Y.G., Varavin V.S., Pociask-Bialy M., Mynbaev K.D. // Semicond. Sci. Technol. 2012. V. 27. N 3. P. 035001. DOI: 10.1088/0268-1242/27/3/035001
- [14] Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M. // Russ. Phys. J. 2015. V. 58. N 4. P. 540–551. DOI: 10.1007/s11182-015-0532-7
- [15] Sze S.M., Ng K.K. Physics of semiconductor devices. Hoboken, N.J., USA: John Wiley & Sons, Inc., 2006. 832 p.