

УДК 621.315.592

Особенности адмиттанса МДП-структур на основе варизонного МЛЭ p -HgCdTe ($x = 0,22—0,23$)

А. В. Войцеховский, С. Н. Несмелов, С. М. Дзядух, В. В. Васильев, В. С. Варавин,
С. А. Дворецкий, Н. Н. Михайлов, В. Д. Кузьмин, В. Г. Ремесник, Ю. Г. Сидоров

Экспериментально исследован адмиттанс МДП-структур на основе МЛЭ p -HgCdTe ($x = 0,22—0,23$) в широком диапазоне частот и температур. Дифференциальное сопротивление области пространственного заряда для МДП-структуры на основе p -HgCdTe, легированного As, ограничено процессами туннельной генерации в диапазоне температур 8—100 К. Для МДП-структур на основе пленки p -HgCdTe, в которой произошла конверсия типа проводимости после отжига, сопротивление области пространственного заряда определяется генерацией Шокли-Рида в диапазоне температур 50—77 К.

PACS: 73.40Qv, 73.21As, 85.60Gz, 73.61Ga.

Ключевые слова: МДП-структура, теллурид кадмия ртути, состав, варизонный слой, спектроскопия адмиттанса, область пространственного заряда, механизмы генерации носителей заряда.

Введение

Одним из востребованных типов детекторов на основе узкозонного полупроводникового твердого раствора p -Hg_{1-x}Cd_xTe являются матричные фотодиоды для спектрального диапазона окна прозрачности атмосферы 8—14 мкм, которые создаются на основе p - n -переходов из Hg_{1-x}Cd_xTe при $x = 0,21—0,23$ [1, 2]. Выращивание HgCdTe при помощи метода молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) обеспечивает возможности выращивания пленки с заданным распределением состава по толщине пленки, что используется для оптимизации характеристик приборов оптоэлектроники на

основе HgCdTe. Например, создание приповерхностных слоев с повышенным содержанием CdTe позволяет уменьшить влияние поверхностной рекомбинации на время жизни носителей заряда в рабочем слое инфракрасных детекторов [3].

Исследования свойств МДП-структур на основе варизонного МЛЭ p -HgCdTe ($x = 0,22—0,23$) немногочисленны [4—7]. Пока практически не изучены свойства МДП-структур на основе варизонного МЛЭ p -HgCdTe ($x = 0,22—0,23$) при температурах, меньших 77 К, хотя такие исследования могут дать важную информацию о физических процессах в МДП-структурах и в фотодиодных структурах [8, 9].

Целью данной работы являются экспериментальные исследования электрофизических характеристик МДП-структур на основе варизонного МЛЭ p -HgCdTe ($x = 0,22—0,23$) в диапазоне температур (8—300 К) и анализ полученных результатов.

Образцы и методики эксперимента

МДП-структуры для исследований изготавливались на основе p -Hg_{1-x}Cd_xTe, выращенного методом МЛЭ на подложках из GaAs(013). С обеих сторон рабочего слоя при выращивании гетероструктур создавались варизонные слои с повышенным содержанием CdTe. До формирования диэлектрических покрытий параметры гетероструктур были измерены при помощи метода Холла и бесконтактной СВЧ-методики. Технологические и электрофизические параметры некоторых исследованных гетероструктур приведены в таблицах 1 и 2, соответственно.

Войцеховский Александр Васильевич, зав. кафедрой¹.
Несмелов Сергей Николаевич, ст. научный сотрудник¹.
Дзядух Станислав Михайлович, ст. научный сотрудник¹.
Дворецкий Сергей Алексеевич, ст. научный сотрудник¹,
зав. лабораторией².
Васильев Владимир Васильевич, зав. лабораторией².
Варавин Василий Семенович, ст. научный сотрудник².
Михайлов Николай Николаевич, ст. научный сотрудник².
Кузьмин Валерий Давыдович, инженер².
Ремесник Владимир Григорьевич, ст. научный сотрудник².
Сидоров Юрий Георгиевич, главный научный сотрудник².

¹Национальный исследовательский

Томский государственный университет.

Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 36.

Тел. 8 (3822) 41-27-72. E-mail: vav43@mail.tsu.ru

²Институт физики полупроводников СО РАН.

Россия, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13.

E-mail: dvor@isp.nsc.ru

Статья поступила в редакцию 14 августа 2014 г.

© Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Дзядух С. М.,
Васильев В. В., Варавин В. С., Дворецкий С. А.,
Михайлов Н. Н., Кузьмин В. Д., Ремесник В. Г.,
Сидоров Ю. Г., 2014

Таблица 1

Технологические параметры гетероструктур

№ структуры	Состав на поверхности	Толщина верхнего варизонного слоя, мкм	Толщина нижнего варизонного слоя, мкм	Состав в рабочем слое	Толщина рабочего слоя, мкм
1	0,49	0,4	1,3	0,23	7,5
2	0,47	0,45	1,6	0,22	8,1
3	0,22	—	1,6	0,22	8,1

Таблица 2

Электрические параметры гетероструктур (T = 78 К)

№ структуры	Концентрация основных носителей, см ⁻³	Подвижность основных носителей, см ² В ⁻¹ с ⁻¹	Проводимость, Ом ⁻¹ см ⁻¹	Время жизни, нс
1	1,1×10 ¹⁷	260	4,64	100
2, 3	8,8×10 ¹⁵	502	0,72	6

Следует отметить, что структура 1 была получена на основе эпитаксиальной пленки, легированной As, а структуры 2 и 3 были получены на основе пленки, в которой произошла конверсия типа проводимости в результате отжига [10].

Структуры 2 и 3 изготавливались из одной гетероструктуры после разрезания ее на части. При изготовлении структуры 3 проводилось предварительное удаление приповерхностного варизонного слоя путем травления поверхности в растворе Вг₂-НВг, а затем наносился двухслойный диэлектрик SiO₂/Si₃N₄. Для структур 1 и 2 диэлектрическое покрытие наносилось поверх варизонного слоя. Распределение состава по толщине эпитаксиальной пленки для структуры 2, измеренное автоматическим эллипсометром в процессе роста, показано на рис. 1. На вставке рис. 1 показано схематическое изображение исследуемых МДП-структур. На этом рисунке введены следующие обозначения: 1 — подложка из GaAs(013), 2 — буферный слой из ZnTe толщиной 0,1 мкм, 3 — буферный слой из CdTe толщиной 6,2 мкм, 4 — нижний варизонный слой с повышенным составом, 5 — рабочий слой HgCdTe, 6 — верхний варизонный слой с повышенным составом, 7 — слой SiO₂, 8 — слой Si₃N₄, 9 — полевой электрод из In, 10 — тыловой контакт к эпитаксиальной пленке.

Измерения проводились на автоматизированной установке спектроскопии адмиттанса наногетероструктур на базе неоптического криостата Janis и измерителя иммитанса Agilent E4980A. За прямое направление развертки при измерениях принимается изменение напряжения от отрицательных значения к положительным, а за обратное направление развертки — от положительных к отрицательным.

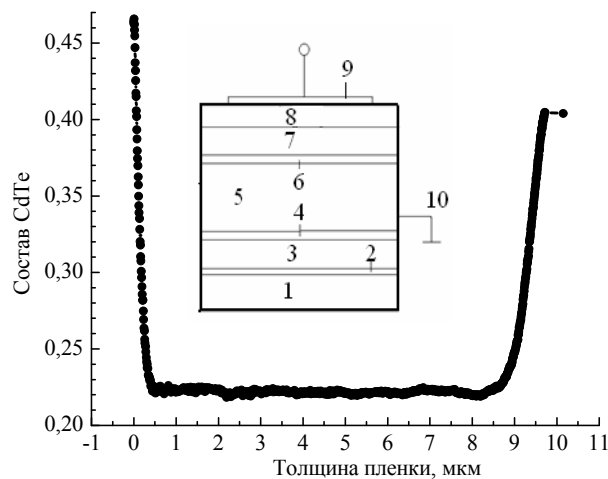


Рис. 1. Распределение состава по толщине структуры 2 на основе гетероэпитаксиального Hg_{1-x}Cd_xTe, выращенного методом МЛЭ. На вставке — схематическое изображение исследуемых МДП-структур с двухслойным диэлектриком (SiO₂/Si₃N₄)

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 2 показаны вольт-фарадные характеристики (ВФХ) для МДП-структур на основе p-Hg_{0,77}Cd_{0,23}Te (структура 1) с варизонным слоем при частоте 200 кГц, температурах 8 и 77 К при различных направлениях развертки напряжения. Из рис. 2 видно, что емкость структуры 1 при 8 К принимает большие значения в сильной инверсии, чем при 77 К, что может быть связано с уменьшением дифференциального сопротивления области пространственного заряда (ОПЗ) при снижении температуры, поскольку время формирования инверсионного слоя пропорционально дифференциальному сопротивлению ОПЗ. На ВФХ, измеренных на частотах 1 МГц и 2 МГц, в обеднении-инверсии появилась особенность, которая может

быть связана с максимумом плотности состояний разрешенных уровней в запрещенной зоне полупроводника, которые расположены вблизи границы раздела диэлектрик-полупроводник и по данным анализа ВФХ имеют энергию около $E_c-0,14$ эВ. Из температурных зависимостей приведенной проводимости полупроводника (G/ω) на разных частотах следует, что в этой структуре присутствуют глубокие уровни с энергией $E_c-(0,138—0,146)$ эВ. Отметим, что гистерезис ВФХ при температуре 77 К значительно больше для структуры 1, чем при 8 К.

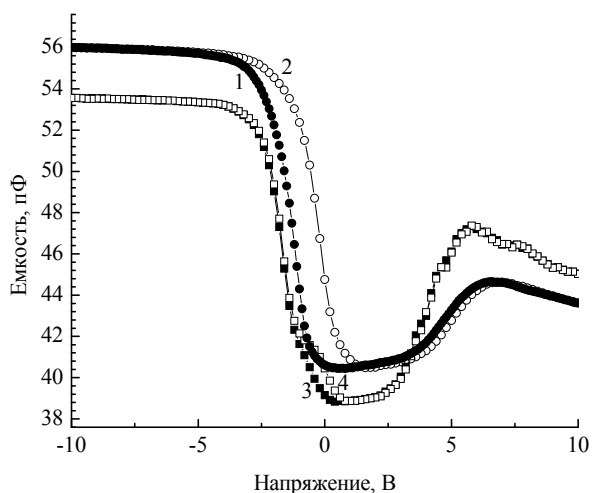


Рис. 2. Вольт-фарадные характеристики МДП-структуры на основе $p\text{-HgCdTe}$ с варизонным слоем (структура 1), измеренные на частоте 200 кГц при температурах 77 К (1, 2) и 8 К (3, 4) при прямой (1, 3) и обратной развертке (2, 4) напряжения

На рис. 3 показаны вольт-фарадные характеристики (ВФХ) для МДП-структур на основе варизонного $p\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ (структура 2) при частоте 200 кГц, температурах 30 и 77 К при различных направлениях развертки напряжения. По данным спектроскопии адмиттанса в этой структуре присутствуют глубокие уровни с энергией $E_v+(0,04—0,08)$ эВ. Наличие приповерхностного варизонного слоя с повышенным составом приводит к существенному увеличению модуляции емкости на ВФХ для МДП-структур на основе МЛЭ $p\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,22$) при температурах 77 К и 30 К. Снижение температуры от 77 до 30 К для МДП-структур на основе варизонного МЛЭ $p\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,22$) приводит к уменьшению частоты перехода ВФХ к высокочастотному виду и увеличению сопротивления объема эпитаксиальной пленки. Сопротивление объема эпитаксиальной пленки для МДП-структур на основе МЛЭ $p\text{-HgCdTe}$ ($x = 0,22$) обычно существенно больше сопротивления объема для МДП-структур на основе МЛЭ $n\text{-HgCdTe}$ ($x = 0,22$) из-за меньших значений подвижности основных носителей (дырок).

Для МДП-структур на основе МЛЭ $p\text{-HgCdTe}$ ($x = 0,22$) с двухслойным диэлектриком $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ обнаружены «максимумы» на ВФХ в начале обогащения при температуре 30 К, частоте 500 кГц. Эти «максимумы» связаны с немонотонной зависимостью измеряемой емкости от емкости приповерхностной области полупроводника при больших значениях сопротивления объема эпитаксиальной пленки. Различие хода ВФХ структуры 2 при температуре 77 К значительно больше, чем при 30 К.

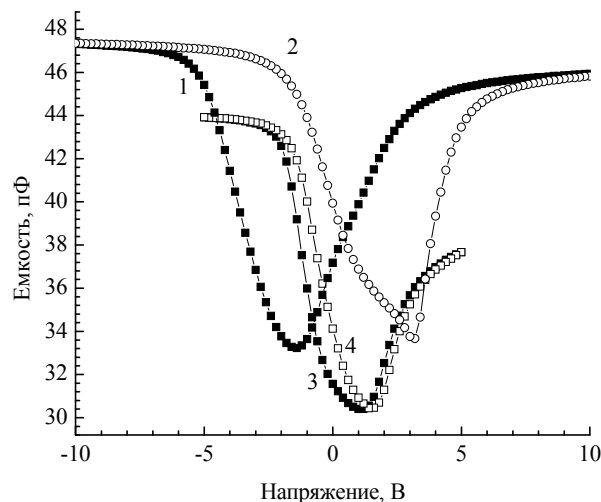


Рис. 3. Вольт-фарадные характеристики МДП-структуры на основе $p\text{-HgCdTe}$ с варизонным слоем (структура 2), измеренные на частоте 200 кГц при температурах 77 К (1, 2) и 30 К (3, 4) при прямой (1, 3) и обратной развертке (2, 4) напряжения

На рис. 4 приведены температурные зависимости сопротивления объема эпитаксиальной пленки для МДП-структур на основе МЛЭ $p\text{-HgCdTe}$ (структуры 1—3) [4, 11]. На вставке показана зависимость проводимости на постоянном токе от обратной температуры для рабочего слоя структуры 1. Видно, что на зависимостях сопротивления объема эпитаксиальной пленки от температуры и проводимости на постоянном токе от обратной температуры можно выделить три участка. При увеличении температуры от 8 до примерно 50 К сопротивление объема эпитаксиальной пленки уменьшается, что связано с тепловой активацией примеси для структуры 1. При увеличении температуры от 50 до 120 К сопротивление объема эпитаксиальной пленки слабо увеличивается, что связано с уменьшением подвижности дырок. При дальнейшем увеличении температуры сопротивление объема эпитаксиальной пленки уменьшается, что связано с ростом собственной концентрации носителей. На зависимости проводимости на постоянном токе от обратной температуры участки 1 и 3 можно аппроксимировать прямой, что позволяет определить энергии активации. Энергетическое положение примеси As составляет

$E_V + 4$ мэВ (участок 3, вставка рис. 4). Энергия активации высокотемпературного участка роста проводимости (участок 1, вставка рис. 4) составляет 173 мэВ, что близко к среднему значению ширины запрещенной зоны для $p\text{-Hg}_{0,77}\text{Cd}_{0,23}\text{Te}$ в диапазоне температур 120—300 К. Для структур 2 и 3 также наблюдаются аналогичные участки на температурной зависимости сопротивления объема эпитаксиальной пленки (рис. 4, кривые 2 и 3).

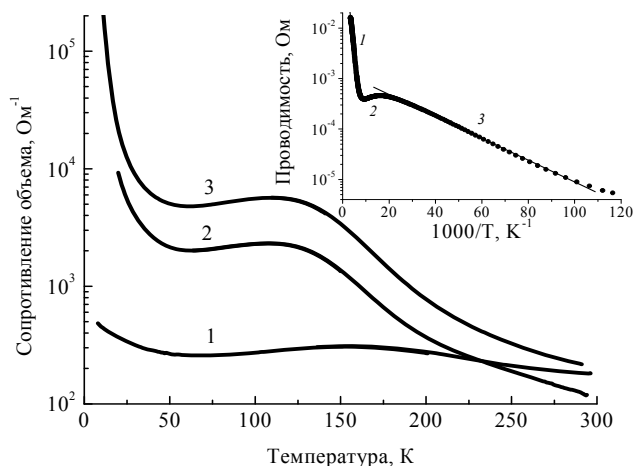


Рис. 4. Температурные зависимости сопротивления объема, измеренные на частоте 1 МГц, для МДП-структуры на основе $p\text{-HgCdTe}$ (1 — структура 1, 2 — структура 2, 3 — структура 3). На вставке — зависимость проводимости на постоянном токе рабочего слоя структуры 1 от обратной температуры

На рис. 5 показаны зависимости дифференциального сопротивления ОПЗ от обратной температуры для двух различных МДП-структур, сформированных на $p\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ каждой из структур 1—3. Кривые 2, 4, 6 на рис. 5 рассчитаны разными способами: из измерений частотных зависимостей приведенной проводимости в сильной инверсии (способ 1) и из измерений зависимостей полной проводимости от напряжения с последующей обработкой результатов по формулам [11] (6) (способ 2). Из рис. 5 видно, что для структуры 1 при охлаждении от 100 до 8 К дифференциальное сопротивление ОПЗ монотонно уменьшается. Такой вид зависимости дифференциального сопротивления ОПЗ от температуры характерен для случая ограничения дифференциального сопротивления ОПЗ процессами туннельной генерации (ширина запрещенной зоны зависит от температуры).

Для структур 2 и 3 при охлаждении от 77 до 50 К дифференциальное сопротивление ОПЗ монотонно увеличивается. Значение дифференциального сопротивления ОПЗ несколько больше для МДП-структуры на основе $p\text{-HgCdTe}$ с варизонным слоем (структура 2), чем для МДП-структуры на основе $p\text{-HgCdTe}$ без варизонного слоя (структура 3). Наиболее вероятно, что доминирующим

механизмом генерации неосновных носителей для структур 2 и 3 в диапазоне температур 50—77 К является генерация Шокли-Рида [2]. Это подтверждается проведенными ранее измерениями полевых зависимостей фотоЭДС для таких структур [7]. Высокотемпературный спад дифференциального сопротивления ОПЗ для структур 1—3 связан с доминированием при повышении температуры процессов диффузии неосновных носителей заряда из квазинейтрального объема к поверхности.

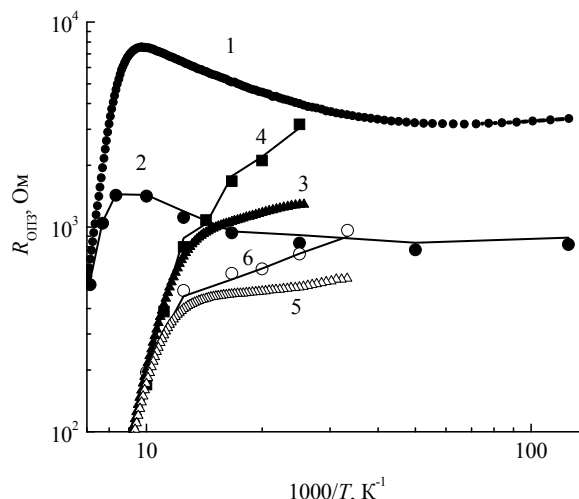


Рис. 5. Зависимости дифференциального сопротивления ОПЗ от обратной температуры для различных точек МДП-структур на основе $p\text{-HgCdTe}$: 1, 2 — структура 1; 3, 4 — структура 2; 5, 6 — структура 3. Линиями для кривых 2, 4, 6 показаны зависимости, построенные способом 1, а точками — способом 2

Заключение

В работе проведены экспериментальные исследования полной проводимости МДП-структур на основе варизонного МЛЭ $p\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,22\text{—}0,23$) на частотах 10 кГц—2 МГц в широком диапазоне температур (8—300 К). Измерения ВФХ на разных частотах для МДП-структуры на основе варизонного МЛЭ $p\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,23$), легированного As, показали, что снижение температуры от 77 до 8 К приводит к появлению особенности, которая может быть связана с проявлением высокой плотности состояний разрешенных уровней в запрещенной зоне приповерхностной области полупроводника. Энергия этих уровней по данным ВФХ составляет около $E_c - 0,14$ эВ. По данным спектроскопии адмиттанса в этой структуре присутствуют глубокие уровни с энергией $E_c - (0,138\text{—}0,146)$ эВ. На ВФХ МДП-структур на основе МЛЭ $p\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,22$), полученного в результате отжига, измеренной на частоте 1 МГц при температуре 77 К, замечена особенность в обеднении, которая может быть связана с прояв-

лением высокой плотности состояний разрешенных уровней в запрещенной зоне приповерхностной области полупроводника. По данным спектроскопии адмиттанса в этой структуре присутствуют глубокие уровни с энергией $E_v + (0,04—0,08)$ эВ. Установлено, что создание приповерхностного варизонного слоя приводит к увеличению гистерезиса ВФХ характеристик при прямой и обратной развертке напряжения. Снижение температуры от 77 К до 30 К приводит к значительному уменьшению величины гистерезиса ВФХ.

На зависимости сопротивления объема МДП-структур на основе МЛЭ $p\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,22—0,23$) можно выделить три участка: уменьшение сопротивления объема при увеличении температуры от 8 К до 50 К за счет активации примеси, относительно слабое увеличение сопротивления объема, связанное с изменением подвижности дырок, при нагреве от 50 К до 120 К и высокотемпературный спад сопротивления объема, вызванный увеличением собственной концентрации носителей. Из зависимости проводимости на постоянном токе от обратной температуры определена энергия активации A_s , которая составила 4 мэВ от потолка валентной зоны, а также среднее значение ширины запрещенной зоны в диапазоне температур 120 К — 300 К, которое составило 173 мэВ.

Температурные зависимости дифференциального сопротивления ОПЗ для МДП-структур на основе варизонного МЛЭ $p\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,23$), легированного As, свидетельствуют об ограничении дифференциального сопротивления ОПЗ процессами туннельной генерации неосновных носи-

телей (наиболее вероятно, межзонной туннельной генерацией). Для МДП-структур на основе МЛЭ $p\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,22$), полученного в результате отжига, с варизонным слоем и без варизонного слоя при охлаждении от 77 до 50 К дифференциальное сопротивление ОПЗ несколько увеличивается, что можно объяснить тем, что в обоих случаях дифференциальное сопротивление ОПЗ ограничено процессами генерации Шокли-Рида. Работа была поддержана Госзаданием № 16.1032.2014/К.

Литература

1. *Рогальский А.* Инфракрасные детекторы: пер. с англ. под ред. А. В. Войцеховского. — Новосибирск: Наука, 2003.
2. *Войцеховский А. В., Давыдов В. Н.* Фотоэлектрические МДП-структуры из узкозонных полупроводников. — Томск: Радио и связь, 1990.
3. *Овсяк В. Н., Курьшев Г. Л., Сидоров Ю. Г. и др.* Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона. — Новосибирск: Наука, 2001.
4. *Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Дзядух С. М.* // Изв. вузов. Физика. 2005. № 6. С. 31.
5. *Овсяк В. Н., Ярцев А. В.* // Прикладная физика. 2007. № 5. С. 80.
6. *Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M.* // Thin Solid Films. 2012. V. 522C. P. 261.
7. *Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M.* // Thin Solid Films. 2014. V. 551. P. 92.
8. *He W., Celik-Butler Z.* // Solid-State Electron. 1996. V. 39. No. 1. P. 127.
9. *Zvara M., Grill R., Hlidek P., et al.* // Semicond. Sci. Technol. 1995. No. 10. P. 1145.
10. *Варавин В. С., Дворецкий С. А., Костюченко В. Я. и др.* // ФТП. 2004. № 5. С. 532.
11. *Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Дзядух С. М.* // Изв. вузов. Физика. 2009. № 10. С. 3.

The peculiarities of admittance of MIS structures based on graded-gap MBE $p\text{-HgCdTe}$ ($x = 0.22—0.23$)

A. V. Voitsekhovskii¹, S. N. Nesmelov¹, S. M. Dzyadukh¹, V. V. Vasil'ev², V. S. Varavin², S. A. Dvoretzki^{1,2}, N. N. Mikhailov², V. D. Kuzmin², V. G. Remesnik² and Yu. G. Sidorov²

¹National Research Tomsk State University
36 Lenin av., Tomsk, 634050, Russia
E-mail: vav@elefot.tsu.ru

²Institute of Semiconductor Physics, SB of RAS
13 Acad. Lavrent'ev av., Novosibirsk, 630090, Russia
E-mail: ifp@isp.nsc.ru

Received August 14, 2014

The admittance of MIS structures based on MBE $n\text{-HgCdTe}$ ($x = 0.22—0.23$) was experimentally investigated in wide frequency range and wide temperature range. The differential

resistance of space charge region in strong inversion mode for MIS structures based on MBE As-doped p-HgCdTe is limited of the tunnel processes in temperature range 8—100 K. For MIS structures based on MBE p-HgCdTe film with conversion of conductivity type by annealing the Shockley-Read generation is dominated in temperature range 50—77 K.

PACS: 73.40Qv, 73.21As, 85.60Gz, 73.61Ga.

Keywords: MIS structure, mercury cadmium telluride, molecular-beam epitaxy, near-surface graded-gap layer, admittance spectroscopy, space charge region, mechanisms of generation of charge carriers.

References

1. A. Rogalskii, *Infrared Detectors* (Nauka, Novosibirsk, 2003) [in Russian].
2. A. V. Voitsekhovskii and V. N. Davydov, *Photoelectric MIS Structures of Narrow Gap Semiconductors* (Radio i Svyaz', Tomsk, 1990) [in Russian].
3. V. N. Ovsyuk, G. L. Kuryshv, Yu. G. Sidorov, et al., *IR FPA* (Nauka, Novosibirsk, 2001) [in Russian].
4. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, and S. M. Dzyadukh, *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved, Fizika*, No. 6, 31 (2005).
5. V. N. Ovsyuk and A. V. Yartsev, *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 80 (2007).
6. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, and S. M. Dzyadukh, *Thin Solid Films* **522C**, 261 (2012).
7. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, and S. M. Dzyadukh, *Thin Solid Films* **551**, 92 (2014).
8. W. He and Z. Celik-Butler, *Solid-State Electron.* **39**, 127 (1996).
9. M. Zvara, R. Grill, P. Hlidek, et al., *Semicond. Sci. Technol.*, No. 10, 1145 (1995).
10. V. S. Varavin, S. A. Dvoretzky, V. Ya. Kostyuchenko, et al., *Semiconductors*, No. 5, 532 (2004).
11. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, and S. M. Dzyadukh, *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved, Fizika*, No. 10, 3 (2009).