

УДК 621.315.592

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

Адмиттанс МДП-структур на основе МЛЭ $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21-0,23$) в широком диапазоне температур

А. В. Войцеховский, Н. А. Кульчицкий, С. Н. Несмелов, С. М. Дзядух

Рассмотрены особенности электрофизических свойств $n(p)\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21-0,23$) с диэлектриками Al_2O_3 или $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$. Пленки HgCdTe были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках из $\text{GaAs}(013)$ и $\text{Si}(013)$. Обсуждены возможности определения основных параметров МДП-структур на основе $n(p)\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21-0,23$) с варизонным слоем и без варизонного слоя из адмиттанса структур, измеренного в широком диапазоне температур и частот.

Ключевые слова: МДП-структура, HgCdTe , молекулярно-лучевая эпитаксия, альтернативные подложки, адмиттанс, варизонный слой.

Введение

Полупроводниковый твердый раствор теллурида кадмия и ртути ($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, HgCdTe) давно используется для создания высокочувствительных инфракрасных детекторов [1]. Ширина запрещенной зоны $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ зависит от содержания CdTe , что позволяет создать на основе данного материала детекторы для различных спектральных областей, в том числе для спектральных диапазонов окон прозрачности атмосферы 3–5 и 8–14 мкм. Молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) HgCdTe позволяет выращивать пленки с заданным распределением состава по толщине эпитаксиальной пленки. Эта возможность используется для оптимизации характеристик инфракрасных детекторов, например, путем создания приповерхностных варизонных слоев с повышенным содержанием

CdTe , которые приводят к уменьшению влияния поверхностной рекомбинации на время жизни фотоносителей в объеме эпитаксиальной пленки HgCdTe [2].

Важной технологической операцией при создании приборов оптоэлектроники на основе HgCdTe является нанесение на поверхность пассивирующих слоев [1]. Структура металл-диэлектрик-полупроводник часто используется для исследования свойств диэлектрика, границы раздела и приповерхностного слоя полупроводника. Для пассивации HgCdTe широко применяется CdTe , но поиски новых пассивирующих покрытий для некоторых применений продолжаются и в настоящее время [3].

Возможности применения традиционных методов характеристики пассивирующих покрытий путем исследования электрофизических характеристик МДП-структур [4] ограничены особенностями МДП-структур на основе МЛЭ HgCdTe , а именно, большим значением сопротивления объема эпитаксиальной пленки, а также возможным наличием приповерхностного варизонного слоя. Первые исследования электрофизических характеристик МДП-структур на основе МЛЭ HgCdTe , выращенных на подложках из CdZnTe , были проведены в Texas Instruments Inc., Dallas, USA [5, 6], причем МДП-структуры в работе [6] формировались на основе материала, содержащего n -изотипный гетеропереход в активной области. Позже начались исследования свойств МДП-структур на основе варизонного МЛЭ HgCdTe ,

Войцеховский Александр Васильевич¹, зав. кафедрой, д.ф.-м.н.
Кульчицкий Николай Александрович², профессор, д.ф.-м.н.
Несмелов Сергей Николаевич¹, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.

Дзядух Станислав Михайлович¹, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет.
Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 36.

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

² Московский технологический университет МИРЭА.

Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78.

E-mail: n.kulchitsky@gmail.com

Статья поступила в редакцию 15 ноября 2016 г.

© Войцеховский А. В., Кульчицкий Н. А., Несмелов С. Н., Дзядух С. М., 2017

выращенного на альтернативных подложках в Институте физики полупроводников имени А. В. Ржанова СО РАН, Россия [7–9]. Отметим, что большинство исследований электрофизических характеристик МДП-структур на основе варизонного МЛЭ HgCdTe проводилось при температуре 77 К. С развитием эпитаксиальных технологий формирования HgCdTe стали появляться работы, в которых предлагались методики обработки экспериментальных вольт-фарадных характеристик (ВФХ) МДП-структур на основе HgCdTe с неоднородным распределением состава [10, 11]. Так, в работе [10] реальный профиль состава в варизонном слое MOVPE HgCdTe, который возникал в результате отжига в атмосфере Cd/Hg, заменялся ступенчатым приближением. В работе [11] предложено оценивать концентрацию основных носителей в варизонном HgCdTe, выращенном методом жидкофазной эпитаксии, по наклону ВФХ в режиме обеднения, что дает завышенные значения концентрации из-за экранирующего действия поверхностных состояний, а состав – по значению емкости в минимуме низкочастотной ВФХ.

Целью данной работы является анализ результатов экспериментальных исследований адмиттанса (полной комплексной проводимости) МДП-структур на основе МЛЭ $n(p)$ -Hg_{1-x}Cd_xTe ($x = 0,21–0,23$), в том числе с приповерхностными варизонными слоями, для совершенствования методик оценки качества пассивирующих покрытий приборов на основе МЛЭ Hg_{1-x}Cd_xTe ($x = 0,21–0,23$).

Образцы и методики эксперимента

Исследуемые МДП-структуры изготавливались на основе n -Hg_{1-x}Cd_xTe, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии на альтернативных подложках GaAs(013) или Si(013). Альтернативные подложки имеют преимущества по сравнению с CdZnTe в плане стоимости, а также при согласовании температурных коэффициентов расширения подложек с кремниевой считывающей схемой в гибридной конфигурации. При выращивании гетероструктур с обеих сторон рабочего слоя создавались варизонные слои с повышенным компонентным составом CdTe. Распределение состава по толщине эпитаксиальной пленки для типичной структуры с $x = 0,22$, измеренное

автоматическим эллипсомером в процессе роста, показано на рис. 1. На вставке рис. 1 приведено схематическое изображение исследуемой МДП-структуры. Типичные технологические и электрические параметры выращенных гетероструктур приведены, например, в работе [12]. Некоторые структуры создавались в двух вариантах: для части гетероструктуры диэлектрик наносился поверх варизонного слоя, а для другой части гетероструктуры проводилось предварительное удаление приповерхностного варизонного слоя путем травления поверхности в растворе Br₂-HBr, а затем наносился диэлектрик (обычно SiO₂/Si₃N₄ или Al₂O₃). Затем наносились индиевые полевые электроды, причем площадь электрода определялась для каждой исследованной структуры. При расчетах для аппроксимации распределения содержания CdTe (x) от координаты z в приповерхностном слое использовалась следующая формула:

$$x(z) = x_0 + A_1 \exp\left(-\frac{z}{B_1}\right),$$

где x_0 – состав в рабочем слое, A_1 и B_1 – коэффициенты, которые определяют распределение состава. Сумма $A_1 + x_0$ определяет состав на поверхности полупроводника и B_1 характеризует скорость уменьшения содержания CdTe к значению состава в рабочем слое x_0 . Для типичных варизонных слоев характерны следующие диапазоны изменения параметров: $A_1 + x_0$ изменяется от 0,43 до 0,48, B_1 изменяется от 0,10 до 0,18 мкм.

Измерения проводились на автоматизированной установке спектроскопии адмиттанса наногетероструктур на базе неоптического криостата Janis и измерителя иммитанса Agilent E4980A. При измерении полевых зависимостей емкости и проводимости за прямое направление развертки принимается изменение напряжения от отрицательных значения к положительным, а за обратное направление развертки – от положительных к отрицательным.

Влияние сопротивления объема на измеряемые емкость и проводимость исключалось для всех измерений. Эквивалентные схемы МДП-структуры в различных режимах и формулы для обработки экспериментальных данных приведены в [12].

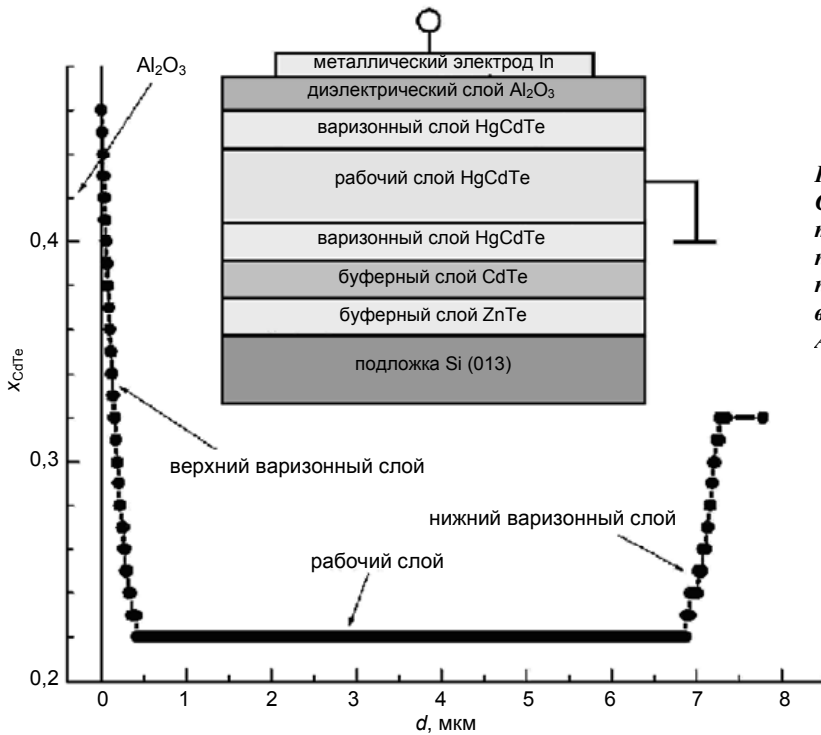


Рис. 1. Типичная зависимость содержания CdTe (x_{CdTe}) в относительных единицах от толщины пленки d для пленки МЛЭ $Hg_{1-x}Cd_xTe$ при $x = 0,22$. На вставке – схематическое представление исследуемой МДП-структуры с варизонным слоем, подложкой из Si(013) и Al_2O_3 в качестве диэлектрика.

Электрофизические характеристики МДП-структур на основе МЛЭ HgCdTe

На рисунках 2, а и 2, б показаны ВФХ для МДП-структур на основе МЛЭ $n-Hg_{0,77}Cd_{0,23}Te$ с диэлектриком Al_2O_3 и подложкой из Si(013), измеренные на частоте 10 кГц при различных разворотах напряжения при температурах 77 и 9 К соответственно. Из рисунков видно, что создание варизонного слоя приводит к увеличению гистерезиса емкостных характеристик, а также ширины и глубины провала ВФХ, которые имеют при данных условиях вид, близкий к низкочастотному. Для структур с варизонным слоем характерен гистерезис, обусловленный захватом носителей заряда на медленные состояния, которые расположены в переходном слое или в диэлектрике, вблизи границы раздела. Основные особенности гистерезиса для МДП-структур с диэлектриками SiO_2/Si_3N_4 и Al_2O_3 близки и подробно рассмотрены в работе [13]. Увеличение гистерезиса при создании широкозонного слоя в приповерхностной области может быть связано с большим диапазоном изменения поверхностного потенциала в варизонных структурах. Несколько неожиданно появление максимумов на ВФХ при низких температурах, которые могут быть связаны с моноэнергетическим уровнем поверхностных состояний (для структуры без варизонного слоя) или с глубоким уровнем (для структуры с варизонным слоем). При увеличении температуры максимумы становятся менее выраженными и исчезают при 50–77 К. Появление максимумов не зависит от типа пассиви-

рующего покрытия (Al_2O_3 или SiO_2/Si_3N_4) или типа подложки, максимумы емкости сопровождаются максимумами проводимости и наблюдались примерно для половины исследованных образцов. При подсветке амплитуда максимумов возрастает, причем максимумы проявляются при более высоких частотах. Для структур с варизонным слоем проявление глубоких уровней возможно только при их локализации в рабочем слое вблизи области пространственного заряда (ОПЗ), поскольку вблизи границы раздела ширина запрещенной зоны очень значительна. Причины исчезновения максимумов при нагреве МДП-структур на основе $n-Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x = 0,21-0,23$) остаются дискуссионными и могут быть связаны с увеличением ширины запрещенной зоны при увеличении температуры или с температурными зависимостями коэффициентов захвата на глубокий уровень. Для МДП-структур на основе $p-Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x = 0,21-0,23$) максимумы на ВФХ не наблюдались.

На рис. 3, а показаны ВФХ МДП-структур на основе МЛЭ $p-Hg_{0,77}Cd_{0,23}Te$ с диэлектриком Al_2O_3 и подложкой из Si(013), измеренные при 77 К на частоте 10 кГц при различных разворотах напряжения. Из рисунка видно, что для ВФХ на частоте 10 кГц при 77 К также типичен практически низкочастотный (НЧ) вид, создание варизонного слоя приводит к увеличению гистерезиса и ширины провала НЧ ВФХ. Следует отметить, что обычно для МДП-структур на основе МЛЭ $p-Hg_{1-x}Cd_xTe$ меньше проводимость эпитаксиальной пленки и больше сопротивление объема эпитаксиальной пленки, что связано с малой подвижностью дырок.

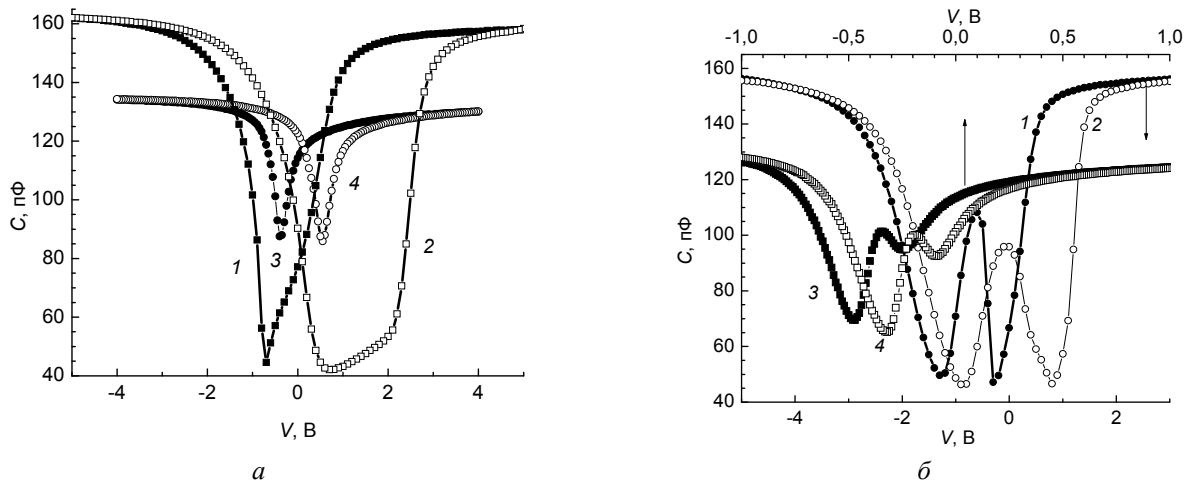


Рис. 2. Зависимости емкости C от напряжения смещения V для МДП-структур на основе $n\text{-Hg}_{0,77}\text{Cd}_{0,23}\text{Te}$ с варизонным слоем (1, 2) и без варизонного слоя (3, 4) с диэлектриком Al_2O_3 , измеренные при прямой (1, 3) и обратной (2, 4) развертке напряжения при частоте 10 кГц при температурах 77 К (а) и 9 К (б).

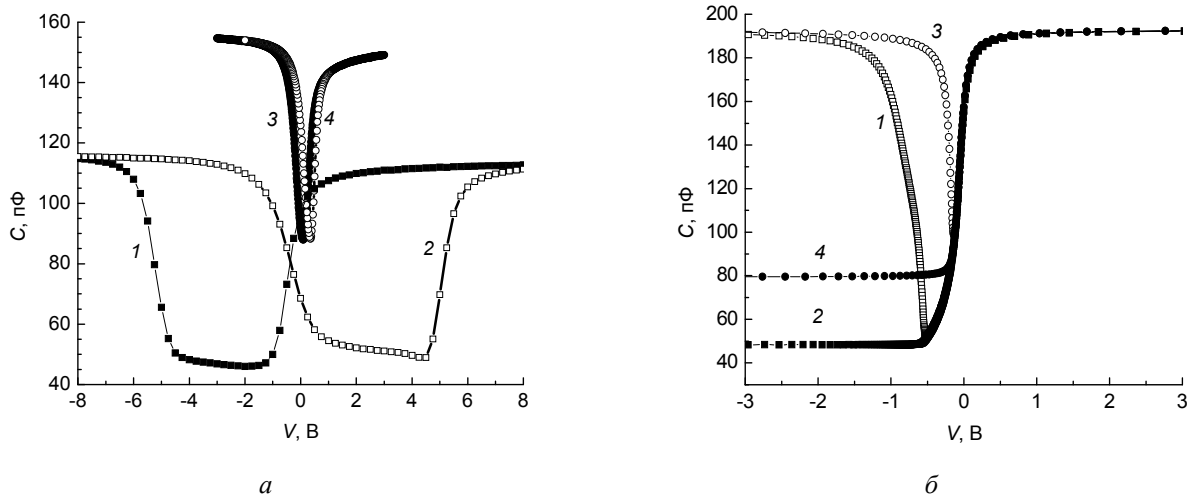


Рис. 3. Экспериментальные зависимости емкости C от напряжения смещения V для МДП-структур на основе $p\text{-Hg}_{0,77}\text{Cd}_{0,23}\text{Te}$ с варизонным слоем (1, 2) и без варизонного слоя (3, 4) с диэлектриком Al_2O_3 , измеренные при 77 К при прямой (1, 3) и обратной (2, 4) развертке напряжения при частоте 10 кГц (а), а также расчетные НЧ и ВЧ зависимости емкости C от напряжения смещения V для МДП-структур на основе $n\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ($n = 1,5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$) с варизонным слоем (1, 2) и без варизонного слоя (3, 4) при температуре 77 К.

Для расчета идеальных ВФХ численно решалось уравнение Пуассона с учетом реального распределения состава в приповерхностном слое полупроводника [14, 15]. На рис. 3, б приведены НЧ и высокочастотные (ВЧ) ВФХ МДП-структур на основе $n\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ с варизонным слоем без такого слоя, рассчитанные при 77 К и концентрации электронов, равной $1,5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Некоторые проблемы при определении концентрации основных носителей в приповерхностном слое МЛЭ $n(p)\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21\text{--}0,23$)

Для корректного определения большинства параметров МДП-структур необходимо знать кон-

центрацию основных носителей заряда в приповерхностном слое эпитаксиальной пленки HgCdTe , которая может существенно отличаться от усредненной концентрации, определенной, например, методом Холла. Для традиционных полупроводников концентрацию основных носителей заряда часто определяют из ВЧ-значения емкости МДП-структуры в режиме сильной инверсии [4]. Проблемой является то, что высокочастотность относительно времени перезарядки инверсионного слоя ВФХ для МДП-структур на основе МЛЭ $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x < 0,23$) при 77 К наблюдается при частотах порядка нескольких мегагерц, при которых очень велико влияние на измеряемый адмиттанс сопротивления объема эпитаксиальной пленки. Этот метод можно использовать для МДП-струк-

тур на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x > 0,3$), для которых ВЧ-вид ВФХ наблюдается при значительно меньших частотах. Другой метод определения концентрации основных носителей требует построения зависимости от напряжения смещения величины, обратной квадрату емкости МДП-структуры в режиме обеднения [4]. При использовании этого метода поверхностные состояния (ПС) обычно приводят к завышенным значениям концентрации. Если ПС не успевают перезарядиться при изменении тестового напряжения, то концентрацию основных носителей заряда можно найти по значению емкости МДП-структуры в минимуме НЧ ВФХ [16]. Отметим, что следует различать высокочастотность ВФХ относительно времени формирования инверсионного слоя и относительно времени перезарядки ПС [4].

Определение концентрации основных носителей и плотности поверхностных состояний для МДП-структур на основе МЛЭ $n(p)\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21\text{--}0,23$) с варизонным слоем

Создание приповерхностного варизонного слоя с повышенным содержанием CdTe приводит к значительному увеличению времени перезарядки ПС, но не приводит к существенному увеличению времени формирования инверсионного слоя, поскольку ширина ОПЗ обычно больше толщины верхнего варизонного слоя с типичными параметрами. Для ВФХ МДП-структур на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21\text{--}0,23$) на частотах 10–50 кГц является высокочастотной относительно времени перезарядки ПС [17, 18], но не является высокочастотной относительно времени формирования инверсионного слоя. Таким образом, для МДП-структур на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21\text{--}0,23$) с варизонным слоем можно найти концентрацию основных носителей заряда путем численного расчета ВФХ с учетом варизонного слоя при различных концентрациях основных носителей заряда. При совпадении экспериментального значения емкости в минимуме ВФХ с расчетным значением, использованная при расчете концентрация основных носителей заряда соответствует концентрации в приповерхностном слое HgCdTe . Следует отметить, что для структур с варизонным слоем времена перезарядки поверхностных состояний очень велики и можно использовать высокочастотный метод для определения спектра поверхностных состояний. При этом необходимо учитывать, что, например, для МДП-структур на основе $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21\text{--}0,23$) с варизонным слоем наклон емкостной характеристики в обеднении более крутой при обратной развертке напряжения (рис. 2), поскольку при прямой развертке напря-

жения в обеднении частично происходит перезарядка медленных поверхностных состояний. Поэтому для расчета спектра ПС для МДП-структур на основе $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21\text{--}0,23$) с варизонным слоем надо использовать ВФХ, измеренную при обратной развертке напряжения. Поскольку ВФХ для МДП-структур на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21\text{--}0,23$) с варизонным слоем имеют ВЧ-вид относительно времени перезарядки поверхностных состояний, то определив концентрацию электронов можно легко найти емкость и напряжение плоских зон, которые будут различными при прямой и обратной развертке напряжения из-за значительного гистерезиса инжекционного типа.

Определение концентрации основных носителей и плотности поверхностных состояний для МДП-структур на основе МЛЭ $n(p)\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21\text{--}0,23$) без варизонного слоя

При пониженных температурах в МДП-структурах на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21\text{--}0,23$) без варизонного слоя наблюдается частотная дисперсия емкости в минимуме ВФХ (рис. 4, а). На рис. 4, б показаны частотные зависимости емкости в минимуме ВФХ при различных температурах.

Появление частотной дисперсии емкости в минимуме ВФХ для МДП-структур на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21\text{--}0,23$) без варизонного слоя связано с увеличением при охлаждении времени перезарядки ПС, расположенных вблизи уровня Ферми для собственного полупроводника. Увеличение времени перезарядки при охлаждении связано с уменьшением собственной концентрации при уменьшении температуры. Для структур на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21\text{--}0,23$) без варизонного слоя можно определить концентрацию основных носителей заряда из измерений адмиттанса при низких температурах и достаточно высоких частотах. При этом можно воспользоваться численным или аналитическим расчетом ВФХ при низких температурах для однородного полупроводника, а можно решить уравнения из работы [19] относительно значений емкости в минимуме низкочастотной ВФХ и соответствующего поверхностного потенциала. Поскольку, для $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21\text{--}0,23$), легированного собственными дефектами донорного типа, в диапазоне температур 9–77 К концентрация электронов не зависит от температуры, то можно оценить плотность поверхностных состояний в структурах без варизонного слоя при 77 К по низкочастотной методике [20]. Для МДП-структур на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21\text{--}0,23$) без варизонного слоя определить напряжение плоских зон из измерений адмиттанса проблематично, поскольку емкость МДП-структуры увеличивается из-за вклада емкости ПС.

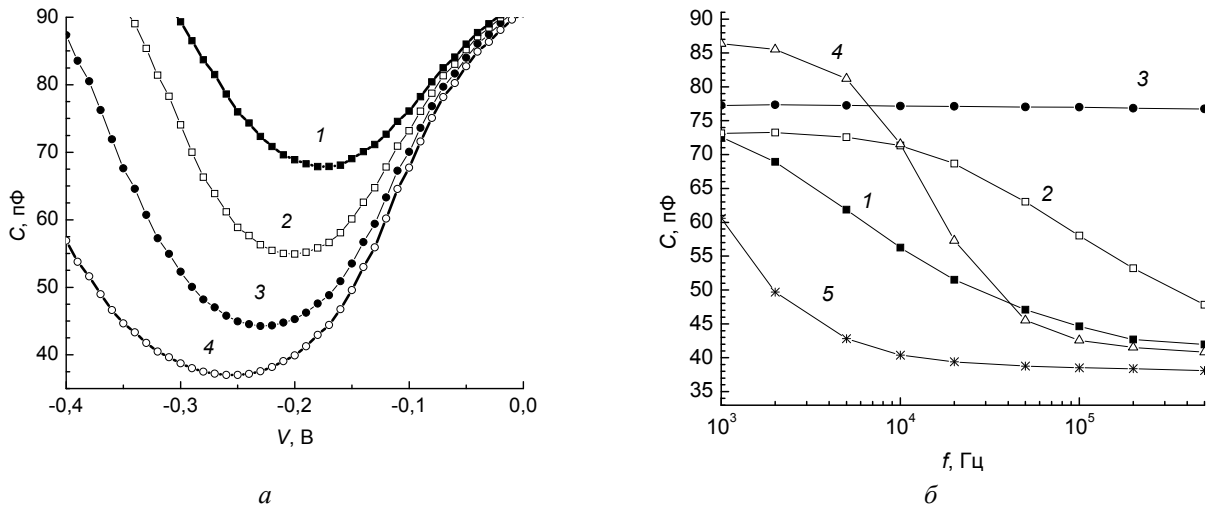


Рис. 4. Фрагменты зависимостей емкости C от напряжения смещения V для МДП-структуры на основе МЛЭ $n\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ без варизонного слоя, измеренные при 9 К при прямой развертке напряжения на различных частотах, кГц: 1 – 2; 2 – 10; 3 – 50; 4 – 200 (а), а также зависимости емкости C от частоты f в минимуме низкочастотной ВФХ для МДП-структуры на основе $n\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ без варизонного слоя, измеренные при прямой развертке напряжения при температурах, К: 1 – 9 К; 2 – 30 К; 3 – 40 К, а также для двух других образцов при 9 К (4, 5) (б).

Температурные зависимости последовательного сопротивления объема и дифференциального сопротивления области пространственного заряда

Следует отметить, что применение описанного выше метода определения концентрации для МДП-структур на основе вакансионно-легированного $p\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21\text{--}0,23$) без варизонного

слоя сопряжено со значительными трудностями, поскольку для вакансионно-легированного материала типично значительное увеличение последовательного сопротивления при низких температурах из-за неполной ионизации вакансионных дефектов акцепторного типа (рис. 5, а). Для МДП-структур на основе $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, легированного за счет собственных дефектов, такая проблема отсутствует.

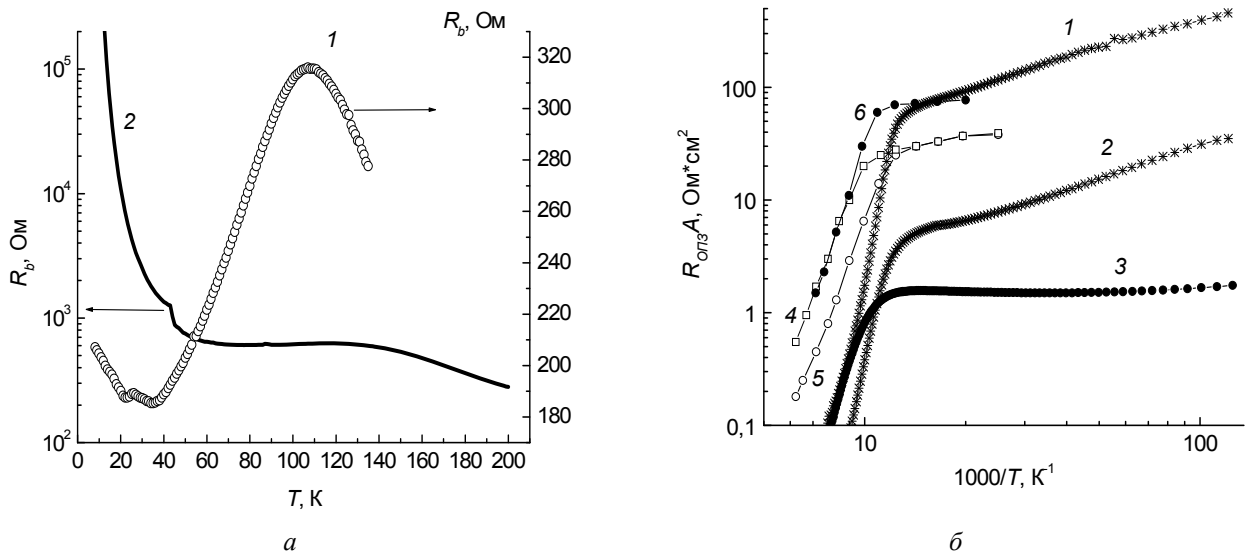


Рис. 5. Зависимости сопротивления объема эпитаксиальной пленки (R_v) от температуры T для $n\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ (1) и $p\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ (2), измеренные на частоте 200 кГц (а), а также зависимости значений произведения дифференциального сопротивления ОПЗ в сильной инверсии на площадь электрода $R_{\text{ОПЗ}}A$ от обратной температуры $1000/T$ для МДП-структур на основе МЛЭ $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, выращенного на подложках из GaAs (1-3) и на подложках из CdZnTe (4-6) [5, 6] для структуры с $x = 0,23$, изготовленной в 2014 году (1), для структур с $x = 0,23$, изготовленных в 2003 году с варизонным слоем (2) и без варизонного слоя (3), для структур на основе однородного по составу $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ при $x = 0,24$ (4) и $x = 0,225$ (5) [5], для структуры, созданной на основе p -изотипного гетероперехода, который состоял из тонкого (около 0,25 мкм) широкозонного слоя $\text{Hg}_{0,7}\text{Cd}_{0,3}\text{Te}$, который формировался сверху толстого узкозонного слоя $\text{Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ (6) [6] (б).

Важной характеристикой МДП-структур является произведение дифференциального сопротивления ОПЗ в режиме сильной инверсии на площадь структуры. Значение $R_{ОПЗ}A$ определяет чувствительность МДП-фотоприемника и может служить характеристикой структурного совершенства эпитаксиальной пленки. На рис. 5, б приведены зависимости значений $R_{ОПЗ}A$ от обратной температуры для МДП-структур на основе МЛЭ $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, выращенного на подложках из GaAs (результаты наших измерений) и CdZnTe (данные Texas Instruments Inc., Dallas, USA). Из рисунка следует, что эпитаксиальные пленки, выращенные в последние годы на подложках из GaAs, имеют значения $R_{ОПЗ}A$, сравнимые с аналогичным параметром для структур, выращенных на подложках из CdZnTe. Создание варизонного слоя эффективно подавляет процессы туннелирования через глубокие уровни. Значения $R_{ОПЗ}A$ для МДП-структур на основе $p\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ на подложках из GaAs несколько меньше, также пока уступают по этому параметру структурам на основе $p(n)\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, выращенные на подложках из Si(013).

Заключение

Установлено, что наличие приповерхностного варизонного слоя приводит к значительному увеличению гистерезиса электрофизических характеристик для МДП-структур на основе МЛЭ $n(p)\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21\text{--}0,23$) с диэлектриками $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ и Al_2O_3 , который связан с перезарядкой медленных состояний. Создание варизонного слоя также приводит к уменьшению собственной концентрации в приповерхностном слое HgCdTe, а также к увеличению диапазона изменения поверхностного потенциала, что проявляется в изменении вида ВФХ (более глубокому и широкому провалу емкости для низкочастотной ВФХ, меньшему значению ВЧ-емкости в сильной инверсии). Обнаружено, появление низкотемпературных максимумов на ВФХ МДП-структур на основе МЛЭ $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21\text{--}0,23$), которые могут быть связаны с перезарядкой глубоких уровней.

Показано, что создание приповерхностного варизонного слоя приводит к значительному увеличению времени перезарядки поверхностных состояний. ВФХ МДП-структур на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21\text{--}0,23$), которая на частотах 10–50 кГц является высокочастотной относительно времени перезарядки поверхностных состояний. Для структур с варизонным слоем при 77 К из измерений значения емкости в минимуме низкочастотной ВФХ можно определить концентрацию основных носителей заряда в приповерхностном слое HgCdTe, а затем емкость и напряжение плоских

зон, а также спектр поверхностных состояний. Для структур на основе $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21\text{--}0,23$) без варизонного слоя для определения концентрации электронов необходимо измерение адмиттанса при низких температурах (10–15 К), когда ВФХ на достаточно высоких частотах принимают ВЧ-вид относительно времени перезарядки поверхностных состояний, расположенных вблизи уровня Ферми для собственного полупроводника. Для структур на основе $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21\text{--}0,23$) без варизонного слоя можно оценить плотность поверхностных состояний при 77 К. Заметим, что МДП-структуры на основе $p\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21\text{--}0,23$) без варизонного слоя при 10–15 К сложны для исследования из-за больших значений сопротивления объема эпитаксиальной пленки.

Показано, что произведение дифференциального сопротивления ОПЗ на площадь структуры для современных МДП-структур на основе $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21\text{--}0,23$), выращенного на подложках из GaAs (013), принимает значения, сравнимые со значениями этого параметра для структур, выращенных на CdZnTe-подложках.

Таким образом, усовершенствованы методики определения параметров МДП-структур на основе МЛЭ $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21\text{--}0,23$) с приповерхностным варизонным слоем и без такого слоя. В случае наличия типичного варизонного слоя (состав на поверхности 0,43–0,48, толщина слоя 0,3–0,5 мкм) можно определить при температуре 77 К концентрацию основных носителей заряда в приповерхностном слое полупроводника по значению емкости в минимуме экспериментальной вольт-фарадной характеристики, а затем найти спектр быстрых поверхностных состояний высокочастотным методом. В случае однородного по составу полупроводника $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21\text{--}0,23$) можно найти концентрацию электронов из измерений адмиттанса при температурах 9–15 К на частотах около 200 кГц. Плотность быстрых поверхностных состояний на границе раздела диэлектрик–полупроводник тогда можно определить при 77 К низкочастотным методом.

Авторы благодарны сотрудникам Института физики полупроводников имени А. В. Ржанова СО РАН Варавину В. С., Васильеву В. В., Дворецкому С. А., Михайлову Н. Н., Якушеву М. В., Сидорову Г. Ю., Парму И. О. за предоставленные эпитаксиальные структуры.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках научного проекта № 16-42-700759.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rogalski A. *Infrared detectors: 2nd. ed.* – New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011.
2. Сидоров Ю. Г., Дворецкий С.А., Варавин В.С., Михайлов Н. Н., Якушев М. В., Сабина И. В. // ФТП. 2001. Т. 35. №. 9. С. 1092.
3. 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. Vol. 45. No. 9. P. 4716.
4. Nicollian E. H. and Brews J. R. *MOS (metal oxide semiconductor) physics and technology.* – New York et al.: Wiley, 1982.
5. Goodwin M. W., Kinch M. A., Koestner R. J. // Journal of Vacuum Science & Technology A. 1989. Vol. 7. No. 2. P. 523.
6. Goodwin M. W., Kinch M. A., Koestner R. J. // Journal of Vacuum Science & Technology A. 1990. Vol. 8. No. 2. P. 1226.
7. Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Коханенко А. П., Мацуков Ю. П., Захарьян Т. И., Васильев В. В., Варавин В. С., Сидоров Ю. Г., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н. // Изв. вузов. Физика. 2005. Т. 48. № 2. С. 35.
8. Ovsyuk V. N., Yartsev A. V. // Proc. SPIE. 2007. Vol. 6636. P. 663617.
9. Vasil'ev V. V., Mashukov Yu. P. // Semiconductors. 2007. Vol. 41. P. 37.
10. An S. Y., Kim J. S., Seo D. W., Suh S. H. // J. Electron. Mater. 2002. Vol. 31. No. 7. P. 683.
11. Rosbeck J. P., Harper M. E. // J. Appl. Phys. 1987. Vol. 62. No. 5. P. 1717.
12. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M. // Opto-Electronics Review. 2014. Vol. 22. No. 4. P. 236.
13. Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Дзядх С. М. // Известия вузов. Физика. 2015. Т. 58. № 4. С. 97.
14. Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Дзядх С. М., Бурлаков И. Д., Селяков А. Ю. // Прикладная физика. 2011. № 5. С. 80.
15. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M. // Thin Solid Films. 2012. Vol. 522. P. 261.
16. Sze S.M., Ng Kwok K. *Physics of Semiconductor Devices*, 3rd ed. – New York: Wiley, 2007.
17. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M. // J. Electron. Mater. 2016. Vol. 45. No. 2. P. 881.
18. Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Дзядх С. М. // Изв. вузов. Физика. 2016. Т. 59. № 2. С. 105.
19. Frankl D. R. // Solid-State Electron. 1961. Vol. 2. No. 1. P. 71.
20. Van Overstraeten R., Declerck G., Broux G. // Journal of the Electrochemical Society. 1973. Vol. 120. No. 12. P. 1785.

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

Admittance of MIS structures based on MBE $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0.22\text{--}0.23$) in a wide temperature range

A. V. Voitsekhovskii¹, N. A. Kulchitsky², S. N. Nesmelov¹, and S. M. Dzyadukh¹

¹National Research Tomsk State University
36 Lenin av., Tomsk, 634050, Russia
E-mail: vav43@mail.tsu.ru

²Moscow Technological University (MIREA)
78 Vernadsky av., Moscow, 119454, Russia
E-mail: n.kulchitsky@gmail.com

Received November 15, 2016

The peculiarities of the electrical properties of $n(p)\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0.21\text{--}0.23$) with the Al_2O_3 or $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ insulator were considered. The HgCdTe films were grown by molecular beam epitaxy on substrates of GaAs (013) and Si (013). The possibilities of determining the main parameters of the MIS structures based on $n(p)\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0.21\text{--}0.23$) with and without graded-gap layers from admittance measurements in wide temperature and frequency ranges were discussed.

Keywords: MIS structure, HgCdTe , molecular beam epitaxy, alternative substrates, admittance, graded-gap layer.

REFERENCES

1. A. Rogalski, *Infrared detectors: 2nd. ed.* (CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, 2011).
2. Yu. G. Sidorov, S. A. Dvoretiskii, V. S. Varavin, et al. *Semiconductors* **35**, 1045 (2001).
3. P. Zhang, Z.-H. Ye, C.-H. Sun, et al., *J. Electron. Mater.* **45**, 4716 (2016).
4. E. H. Nicollian and J. R. Brews, *MOS (metal oxide semiconductor) physics and technology* (Wiley, New York, 1982).
5. M. W. Goodwin, M. A. Kinch, and R. J. Koestner, *J. Vac. Sci. Technol., A*, **7**, 523 (1989).

6. M. W. Goodwin, M. A. Kinch, and R. J. Koestner, *J. Vac. Sci. Technol., A*, **8**, 1226 (1990).
7. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, A. P. Kokhanenko, et al., *Russ. Phys. J.* **48**, 143 (2005).
8. V. N. Ovsyuk and A. V. Yartsev, *Proc. SPIE.* **6636**, 663617 (2007).
9. V. V. Vasil'ev and Yu. P. Mashukov, *Semiconductors* **41**, 37 (2007).
10. S. Y. An, J. S. Kim, D. W. Seo, et al., *J. Electron. Mater.* **31**, 683 (2002).
11. J. P. Rosbeck and M. E. Harper, *J. Appl. Phys.* **62**, 1717 (1987).
12. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, and S. M. Dzyadukh, *Opto-Electron. Rev.* **22**, 236 (2014).
13. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, and S. M. Dzyadukh, *Russ. Phys. J.* **58**, 540 (2015).
14. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, et al., *Prikl. Fiz.*, No. 5, 80 (2011)
15. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, and S. M. Dzyadukh, *Thin Solid Films.* **522**, 261 (2012).
16. S. M. Sze, Ng Kwok K. *Physics of Semiconductor Devices: 3rd ed.* (New York: Wiley, 2007).
17. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, and S. M. Dzyadukh, *J. Electron. Mater.* **45**, 881 (2016).
18. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, and S. M. Dzyadukh, *Russ. Phys. J.* **59**, 284 (2016).
19. D. R. Frankl, *Solid-State Electron.* **2**, 71 (1961).
20. Van Overstraeten, G. Declerck, and G. Broux, *J. Electrochem. Soc.* **120**, 1785 (1973).