

УДК 621.315.592

*А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ**, *С.Н. НЕСМЕЛОВ**, *С.М. ДЗЯДУХ**,
*Д.В. ГРИГОРЬЕВ***, *В.Ф. ТАРАСЕНКО***, *М.А. ШУЛЕПОВ***

**ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ОБЪЕМНОГО НАНОСЕКУНДНОГО РАЗРЯДА
В ВОЗДУХЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
МДП-СТРУКТУР НА ОСНОВЕ p -HgCdTe, ВЫРАЩЕННОГО МЕТОДОМ
МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ¹**

Экспериментально исследовано влияние импульсного объемного наносекундного разряда в воздухе атмосферного давления на адмиттанс МДП-структур на основе варизонного МЛЭ p -Hg_{0.78}Cd_{0.22}Te в широком диапазоне частот и температур. Показано, что воздействие разрядом приводит к значительным изменениям электрофизических характеристик МДП-структур, которые заключаются в увеличении плотности положительного фиксированного заряда, изменению характера гистерезиса вольт-фарадных характеристик, увеличению плотности поверхностных состояний. Возможной причиной изменения характеристик МДП-структур после воздействия является существенная перестройка примесно-дефектной системы полупроводника вблизи границы раздела.

Ключевые слова: МДП-структура, HgCdTe, молекулярно-лучевая эпитаксия, адмиттанс, импульсный объемный наносекундный разряд, фиксированный заряд.

Введение

Одним из основных материалов для изготовления высокочувствительных ИК-фотоприемников для спектральных областей 3–5 и 8–12 мкм являются твердые растворы на основе соединения ртути, кадмия и теллура Hg_{1-x}Cd_xTe. Это обусловлено как физическими свойствами HgCdTe, в частности сравнительно низкой концентрацией носителей заряда при рабочих температурах и высокой квантовой эффективностью в спектральном диапазоне чувствительности, так и успехами в развиваемых технологиях выращивания гетероэпитаксиальных слоев HgCdTe методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), на основе которых изготавливаются многоэлементные фотоприемные устройства [1]. Наряду с исследованием исходных свойств эпитаксиальных пленок HgCdTe, выращенных методом МЛЭ, актуальной является задача контролируемого изменения параметров материала с целью получения заданных полупроводниковых структур.

В настоящее время разряды различных типов и электронные пучки широко используются для модификации приповерхностных слоев различных материалов [2]. Особенностью подобных разрядов является комплексное воздействие плазмы плотного наносекундного разряда с удельной мощностью энерговыклада в сотни мегаватт на кубический сантиметр, сверхкороткого электронного пучка с широким энергетическим спектром и оптического излучения различных спектральных диапазонов из плазмы разряда [3].

Первые экспериментальные данные воздействия импульсов объемного наносекундного разряда в воздухе атмосферного давления на эпитаксиальные пленки МЛЭ p -HgCdTe показали, что это воздействие приводит к изменению электрофизических свойств исходного материала, которое обусловлено образованием в процессе воздействия приповерхностного высокопроводящего слоя n -типа проводимости [4]. Дальнейший анализ экспериментальных данных [5] позволил выдвинуть предположение, что в процессе воздействия объемного наносекундного разряда в приповерхностной области материала происходит образование слоя химических соединений HgCdTe с атомами кислорода и/или азота. Образовавшийся слой характеризуется наличием встроенного положительного заряда, который приводит к образованию инверсионного слоя n -типа проводимости на границе раздела оксид/HgCdTe. Однако доказательной базы для подтверждения данного предположения на данный момент недостаточно. Для верификации выдвинутых предположений необходимо проведение дополнительных исследований, в частности изучение свойств поверхности облученного материала.

¹ Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 14-29-00052.

Одним из широко применяемых методов изучения свойств поверхности полупроводников и границы раздела диэлектрик – полупроводник является исследование электрофизических свойств МДП-структур, создаваемых на основе исследуемого материала. В данной работе представлены результаты исследований влияния импульсов объемного наносекундного разряда в воздухе атмосферного давления на электрофизические свойства МДП-структур на основе гетероэпитаксиального p -HgCdTe, выращенного методом МЛЭ.

Образцы и методики эксперимента

Для проведения исследований была подготовлена серия образцов эпитаксиальной пленки p -HgCdTe ($p = 6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $\mu_p = 550 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, проводимость – $0.55 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$), выращенных методом МЛЭ на подложке из GaAs (013) в ИФП СО РАН. Состав рабочего слоя эпитаксиальных пленок составлял $x = 0.22$. Толщина верхнего варизонного слоя близка к 0.4 мкм, а содержание CdTe на поверхности достигало 0.44.

Часть подготовленных образцов размещались в газовом диоде на медном аноде [4] и подвергались воздействию импульсов объемного наносекундного разряда в воздухе атмосферного давления. В качестве источника импульсного напряжения использовался генератор РАДАН-220, формирующий импульсы напряжения с амплитудой $\sim 230 \text{ кВ}$ (напряжение холостого хода), длительностью импульса на полувысоте $\sim 2 \text{ нс}$ (на согласованной нагрузке) и временем нарастания $\sim 0.5 \text{ нс}$. Облучение образцов проводилось в импульсно-периодическом режиме с частотой следования импульсов 1 Гц. Образцы были облучены 1200 импульсами.

На основе исходных и облученных образцов формировались МДП-структуры. В качестве диэлектрического покрытия использовался слой Al_2O_3 толщиной около 77 нм, нанесенный при помощи плазменного атомно-слоевого осаждения [6]. Металлические полевые электроды формировались из индия, причем площади электродов для структур № 1–5 составляли приблизительно 0.261, 0.251, 0.199, 0.197 и 0.185 мм^2 соответственно. Заметное различие площадей электродов между структурами № 1, 2 и структурами № 3–5 связано с использованием различных масок при напылении индия. Структуры № 3–5 были сформированы на основе пластины, которая подвергалась воздействию импульсов объемного наносекундного разряда в воздухе атмосферного давления, а структуры № 1 и 2 воздействию не подвергались и играли роль контрольных образцов. Нанесение диэлектриков и напыление электродов для МДП-структур № 1–5 проводилось одновременно посредством единого технологического цикла. Химико-механической обработки поверхности HgCdTe перед нанесением Al_2O_3 не проводилось.

Измерения электрофизических характеристик МДП-структур проводились на автоматизированной установке спектроскопии адмиттанса наногетероструктур на базе неоптического криостата Janis и измерителя иммитанса Agilent E4980A в диапазоне частот переменного тестового сигнала 1 кГц – 2 МГц при температуре от 8 до 200 К. За прямое направление развертки при измерениях принимается изменение напряжения от отрицательных значений к положительным, а за обратное направление развертки – от положительных к отрицательным.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены вольт-фарадные характеристики (ВФХ) для структуры № 1, измеренные при 77 К на разных частотах при прямой и обратной развертке напряжения. Для всех ВФХ предварительно исключалось влияние сопротивления объема эпитаксиальной пленки [7, 8]. На рис. 2 и 3 приведены ВФХ для МДП-структур на основе HgCdTe, который подвергался воздействию импульсов объемного наносекундного разряда в воздухе атмосферного давления (структуры № 3 и 4 соответственно), измеренные при 77 К на разных частотах при прямой и обратной развертке напряжения. Для структур № 1 и 2 емкостные характеристики при 77 К оказались качественно сходными, а ВФХ для структуры № 5 близки к ВФХ для структуры № 4. Различие емкостей МДП-структур в режиме обогащения (емкостей диэлектрического слоя) связано с различием площадей металлических полевых электродов. Из рис. 1–3 видно, что ВФХ для структур № 3 и 4 значительно отличаются от аналогичной характеристики для контрольного образца № 1. ВФХ для структур № 3 и 4 сдвинуты в область больших отрицательных напряжений, а также на одной и той же частоте ВФХ для структур № 3 и 4 принимают более низкочастотный вид, чем для структуры № 1. Эти особенности более выражены для структур № 4 и 5, а для структуры № 3 менее заметны. Кроме этого, для структур № 3–5 наблюдается частотная дисперсия емкости в минимуме ВФХ, а

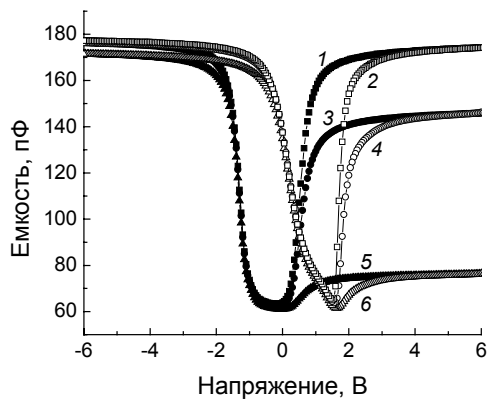


Рис. 1. ВФХ МДП-структуры на основе p -HgCdTe (контрольный образец, структура № 1), измеренные при температуре 77 К при прямой (кр. 1, 3, 5) и обратной (кр. 2, 4, 6) развертке напряжения на частотах, кГц: кр. 1, 2 – 10; кр. 3, 4 – 200; кр. 5, 6 – 1000

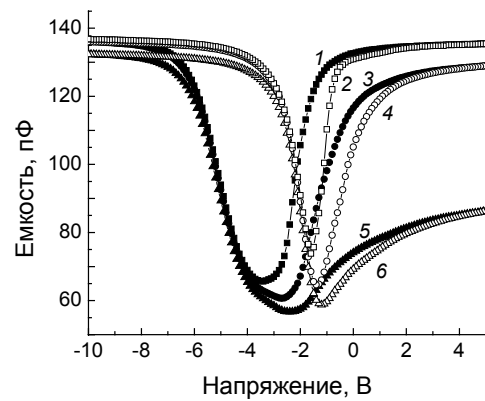


Рис. 2. ВФХ МДП-структуры на основе p -HgCdTe (образец после воздействия импульсов объемного наносекундного разряда в воздухе атмосферного давления, структура № 3), измеренные при температуре 77 К при прямой (кр. 1, 3, 5) и обратной (кр. 2, 4, 6) развертке напряжения на частотах, кГц: кр. 1, 2 – 10; кр. 3, 4 – 200; кр. 5, 6 – 1000

наклон емкостной характеристики в режиме обеднения при прямой развертке напряжения для структур № 3–5 более пологий, чем для контрольных образцов (структуры № 1 и 2). Также для структур № 3–5 значения емкостей в минимуме ВФХ при прямой и обратной развертке напряжения различны, что ярко выражено для структур № 4 и 5 на низких частотах. Для структур № 3–5 проявляется заметно больший гистерезис емкостных характеристик в режиме обеднения по сравнению с характеристиками структур № 1 и 2, а для структур № 4 и 5 заметно больший гистерезис наблюдается и в режиме инверсии. Описанные выше особенности ВФХ МДП-структур на основе пластин, подвергнутых воздействию импульсов объемного наносекундного разряда в воздухе атмосферного давления, иллюстрирует рис. 4, на котором показаны ВФХ для различных структур, измеренные при 40 К на частоте 1 МГц при различных развертках напряжения смещения.

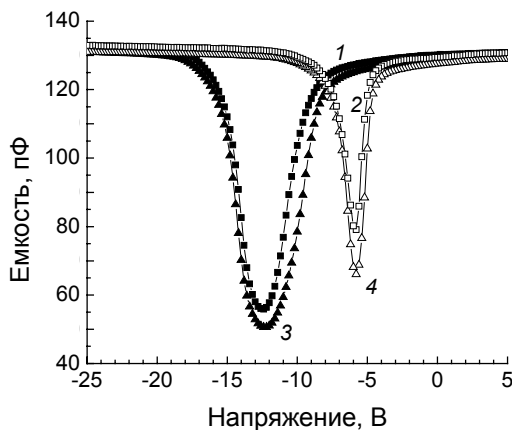


Рис. 3. ВФХ МДП-структуры на основе p -HgCdTe (образец после воздействия импульсов объемного наносекундного разряда в воздухе атмосферного давления, структура № 4), измеренные при температуре 77 К при прямой (кр. 1, 3) и обратной (кр. 2, 4) развертке напряжения на частотах, кГц: кр. 1, 2 – 10; кр. 3, 4 – 1000

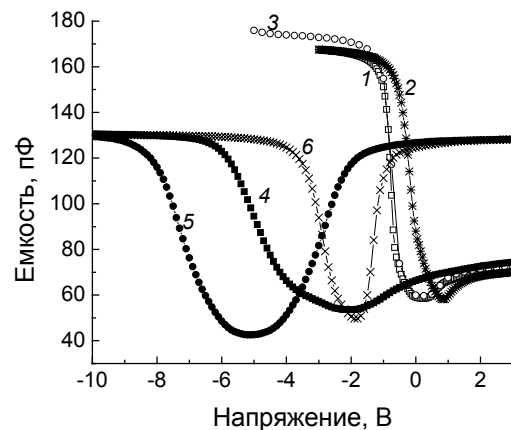


Рис. 4. ВФХ МДП-структур на основе p -HgCdTe, измеренные при температуре 40 К при прямой (кр. 1, 3–5) и обратной (кр. 2, 6) развертке напряжения на частоте 1 МГц: кр. 1, 2 – структура № 1; кр. 3 – структура № 2; кр. 4 – структура № 3; кр. 5, 6 – структура № 4

Основные параметры МДП-структур можно найти из ВФХ, измеренных при 77 К. Для этого необходимо рассчитать идеальную ВФХ. Концентрация основных носителей в приповерхностном

слое обычно отличается от интегральной концентрации, определенной методом Холла. При отсутствии поверхностных состояний и равномерном распределении примеси по толщине в области пространственного заряда концентрацию основных носителей можно определить из экспериментальной ВФХ двумя способами: по наклону зависимости от напряжения смещения величины, обратной квадрату удельной емкости МДП-структуры в режиме обеднения [9], а также по значению емкости в минимуме низкочастотной ВФХ [10]. Необходимым условием практического применения второго метода являются большие времена перезарядки поверхностных состояний, которые обеспечиваются в нашем случае наличием в структуре приповерхностного широкозонного слоя. На рис. 5 приведены зависимости $1/C^2(V)$ для структур № 1–5, где C – удельная емкость МДП-структуры в режиме обеднения. Из рис. 5 видно, что для контрольных (исходных) образцов зависимости $1/C^2(V)$ являются более крутыми, чем аналогичные зависимости для структур № 3–5. Кроме того, зависимости для структур № 3–5 сдвинуты относительно друг друга по оси напряжений и наклон зависимости $1/C^2(V)$ для структуры № 4 более крутой, чем для структур № 3 и 5. По наклону зависимостей, показанных на рис. 5, определяется концентрация основных носителей в приповерхностном слое полупроводника для каждой структуры.

На рис. 6 показаны экспериментальные ВФХ для структур № 2 и 5 при прямой и обратной развертке напряжения, а также идеальные характеристики, рассчитанные при концентрациях дырок, определенных из зависимостей $1/C^2(V)$. Идеальные ВФХ рассчитывались путем численного решения уравнения Пуассона с учетом реального профиля распределения состава по толщине пленки [11]. Из рис. 6 видно, что для структуры № 2 (для структуры № 1 аналогично) значение емкости в минимуме идеальной низкочастотной ВФХ близко к экспериментальным значениям емкости в минимуме ВФХ, измеренной на частоте 10 кГц. Это свидетельствует о низкой плотности поверхностных состояний в контрольных образцах (структуры № 1 и 2).

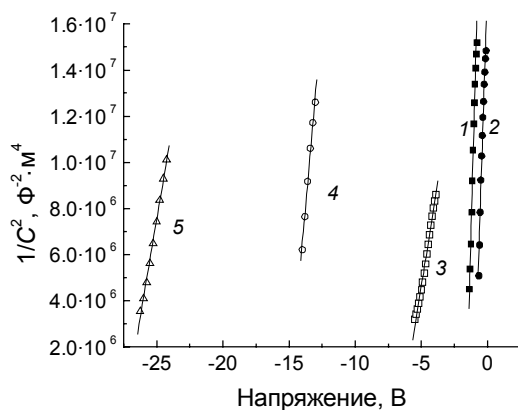


Рис. 5. Зависимости от напряжения смещения величины, обратной квадрату удельной емкости МДП-структур на основе p -HgCdTe в режиме обеднения, построенные из экспериментальных ВФХ, измеренных на частоте 10 кГц при 77 К и прямой развертке напряжения: кр. 1 – структура № 1; кр. 2 – структура № 2; кр. 3 – структура № 3; кр. 4 – структура № 4; кр. 5 – структура № 5

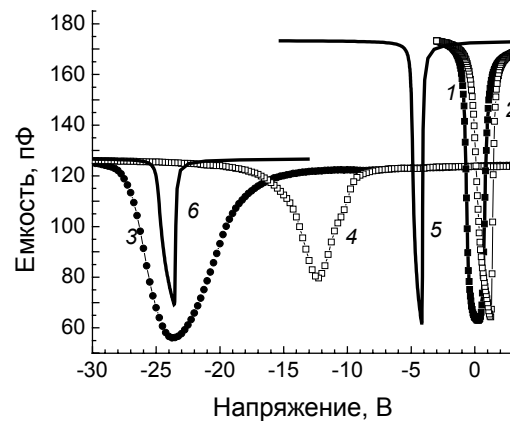


Рис. 6. Экспериментальные ВФХ МДП-структур на основе p -HgCdTe (структуры № 2 (кр. 1, 2) и № 5 (кр. 3, 4)), измеренные при температуре 77 К при прямой (кр. 1, 3) и обратной (кр. 2, 4) развертке напряжения на частоте 10 кГц, а также идеальные ВФХ для структур № 2 (кр. 5) и № 5 (кр. 6), рассчитанные при концентрациях дырок, найденных по наклону зависимостей $1/C^2(V)$. Для наглядности кр. 5 смещена на 5 В, а кр. 6 – на 25 В в сторону увеличения отрицательных напряжений

Для структуры № 5 (аналогично для структур № 3 и 4) значение емкости в минимуме идеальной ВФХ заметно превышает экспериментальное значение емкости в минимуме ВФХ, измеренной при прямой развертке напряжения. Наиболее вероятной причиной этого является высокая плотность поверхностных состояний. Поэтому для структур № 3–5 корректнее определять концентрацию дырок по значению емкости в минимуме экспериментальной ВФХ при прямой развертке напряжения. Использование зависимостей $1/C^2(V)$ дает завышенные значения концентрации дырок, поскольку поверхностные состояния изменяют зависимость поверхностного потенциала от напряжения (и емкости от напряжения), которые в присутствии высокой плотности поверхностных

состояний становятся более пологими. Для образца № 5 проведена оценка средней плотности поверхностных состояний в режиме обеднения, которая дала достаточно высокое значение, равное $4.1 \cdot 10^{12}$ эВ⁻¹·см⁻². Для контрольных структур № 1 и 2 плотность поверхностных состояний существенно меньше, поскольку концентрация дырок, определенная по наклону $1/C^2(V)$ зависимости, близка к концентрации дырок, определенной по значению емкости в минимуме экспериментальной ВФХ.

В таблице приведены основные параметры МДП-структур № 1–5, определенные из измерений ВФХ при 77 К. Плотности фиксированного и эффективного подвижного зарядов определялись по сдвигу напряжения плоских зон в реальных структурах относительно напряжения плоских зон в идеальной структуре. Из приведенных данных следует, что МДП-структуры, сформированные на основе пластины, подвергнутой воздействию импульсов объемного наносекундного разряда в воздухе атмосферного давления, обладают в 10–50 раз большей плотностью положительного фиксированного заряда и в 2–17 раз большей плотностью подвижного заряда по сравнению с контрольными образцами. Следует отметить также, что плотность фиксированного заряда для структур № 3 и 5 отличается практически в 5 раз, а для структур № 1 и 2 только на 20 %. Для структур № 3–5 характерны большие различия в других параметрах по сравнению с контрольными образцами.

Параметры МДП-структур на основе *p*-HgCdTe, определенные из ВФХ при 77 К

№ структуры	Плотность фиксированного заряда, см ⁻²	Плотность подвижного заряда, см ⁻²	Концентрация основных носителей заряда по минимуму ВФХ, см ⁻³	Концентрация основных носителей заряда по $1/C^2(V)$ в обеднении, см ⁻³
1	$1.15 \cdot 10^{11}$	$5.73 \cdot 10^{11}$	$4.05 \cdot 10^{15}$	$3.96 \cdot 10^{15}$
2	$9.49 \cdot 10^{10}$	$2.93 \cdot 10^{11}$	$4.60 \cdot 10^{15}$	$4.63 \cdot 10^{15}$
3	$1.36 \cdot 10^{12}$	$1.28 \cdot 10^{12}$	$1.35 \cdot 10^{16}$	$2.27 \cdot 10^{16}$
4	$3.28 \cdot 10^{12}$	$3.36 \cdot 10^{12}$	$6.30 \cdot 10^{15}$	$1.25 \cdot 10^{16}$
5	$6.77 \cdot 10^{12}$	$4.93 \cdot 10^{12}$	$9.22 \cdot 10^{15}$	$2.40 \cdot 10^{16}$

Важной характеристикой МДП-структур является значение дифференциального сопротивления области пространственного заряда (ОПЗ) в режиме сильной инверсии ($R_{\text{ОПЗ}}$) [12]. Исследованию дифференциального сопротивления ОПЗ в МДП-структурах на основе МЛЭ *n(p)*-HgCdTe ($x = 0.21-0.23$) в широком диапазоне температур посвящены работы [13, 14]. На рис. 7 показаны зависимости $R_{\text{ОПЗ}}$ от обратной температуры для структур № 1–3, рассчитанные из измерений полной проводимости на частоте 200 кГц. Из рис. 7 видно, что дифференциальное сопротивление ОПЗ для структуры № 3 несколько меньше, чем для контрольных образцов № 1 и 2 (различия про-

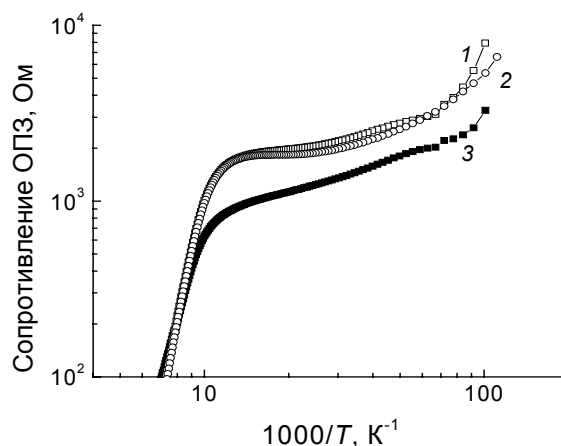


Рис. 7. Зависимости дифференциального сопротивления ОПЗ от обратной температуры для МДП-структур на основе *p*-HgCdTe, измеренные на частоте 200 кГц в режиме сильной инверсии: кр. 1 – структура № 1; кр. 2 – структура № 2; кр. 3 – структура № 3

изведений площадей структуры на $R_{\text{ОПЗ}}$ будут еще больше). Для структур № 4 и 5 величины дифференциальных сопротивлений ОПЗ практически равны нулю (не превышают погрешности определения $R_{\text{ОПЗ}}$) в широком диапазоне частот и температур. Постоянная времени формирования инверсионного слоя равна произведению емкости неосновных носителей в режиме сильной инверсии на дифференциальное сопротивление ОПЗ также в режиме сильной инверсии. Результаты измерений дифференциального сопротивления ОПЗ объясняют низкочастотный вид ВФХ на достаточно высоких частотах для структур № 4 и 5. Малые значения дифференциального сопротивления ОПЗ для структур № 4 и 5 свидетельствуют о высокой скорости потока неосновных носителей заряда (электронов) в инверсионный слой. Наиболее вероятным механизмом появления дополнительных неосновных носителей в инверсионном слое под полевым электродом является обмен электронами с заэлектродным инверсионным слоем, индуцированным в структурах № 4 и 5 значительным положительным фиксированным зарядом, встроенным в диэлектрике или на границе раздела [10, 12]. Этот эффект также называют эффектом растекания, поскольку в сильной инверсии подэлектродный и заэлектродный инверсионный слои соединяются и силовые линии внешнего электрического поля могут достаточно далеко проникать в заэлектродные области [10]. Для структуры № 3 фиксированный заряд меньше и уменьшение дифференциального сопротивления ОПЗ менее выражено, чем для структур № 4 и 5.

Причины появления положительного фиксированного заряда для МДП-структур на основе гетероэпитаксиальных пленок, подвергнутых воздействию импульсов объемного наносекундного разряда в воздухе атмосферного давления, остаются дискуссионными. Результаты, например, можно объяснить появлением после воздействия тонкой диэлектрической пленки на поверхности HgCdTe, связанной с образованием окисла, стимулированного воздействием импульсов объемного наносекундного разряда в воздухе атмосферного давления. Хорошо известно, что положительный фиксированный заряд типичен для анодно-окисной пленки на HgCdTe [15, 16], который обычно связывают с присутствием вакансий кислорода в анодном оксиде [17]. Типичная плотность положительного фиксированного заряда в анодном оксиде составляет величину порядка 10^{12} см^{-2} , причем величина фиксированного заряда пропорциональна толщине анодного оксида при изменении толщины от 50 до 400 нм [12]. Для системы HgCdTe – анодный оксид на расстоянии до 10 нм от границы раздела расположены медленные поверхностные состояния, которые могут обмениваться подвижными носителями заряда с полупроводником посредством туннелирования, а фиксированный заряд расположен на расстоянии более 10 нм от границы раздела [16].

Для исследованных структур толщина образовавшегося диэлектрического слоя должна составлять единицы нанометров, при большей толщине наблюдалось бы уменьшение емкости диэлектрика из-за увеличения толщины пассивирующего покрытия. Поскольку уменьшения емкости диэлектрика для структур № 3–5 не зарегистрировано, можно отметить, что диэлектрический слой (если он является причиной изменения электрофизических характеристик после воздействия импульсов объемного наносекундного разряда в воздухе атмосферного давления) при малой толщине обладает более высокой плотностью положительного фиксированного заряда, чем типичный анодный оксид. Не исключено, что после воздействия в HgCdTe вблизи поверхности возникает тонкий слой с измененными свойствами, в частности с высокой плотностью встроенных положительных зарядов, которые не могут изменять свое зарядовое состояние из-за окружающих заряды потенциальных барьеров.

Воздействие импульсов объемного наносекундного разряда в воздухе атмосферного давления приводит также к изменению других свойств переходного слоя между диэлектриком и полупроводником, что проявляется в появлении некоторых особенностей гистерезиса электрофизических характеристик. Появившиеся особенности гистерезиса заключаются, например, в различии значений емкости в минимуме низкочастотной экспериментальной ВФХ при прямой и обратной развертке напряжения, в изменении соотношения крутизны наклонов емкостной зависимости в обеднении при прямой и обратной развертке напряжения, в особенностях частотной дисперсии ВФХ при прямой и обратной развертке напряжения. Сложно объяснить появление частотной дисперсии ВФХ после воздействия. К подобной частотной дисперсии может приводить перезарядка поверхностных состояний на границе раздела и вклад емкости поверхностных состояний в общую емкость МДП-структуры (что и наблюдается, например, для МДП-структур на основе однородного по составу HgCdTe при $x = 0.20\text{--}0.23$ [7]). Наличие приповерхностного варизонного слоя с повышенным содержанием CdTe значительно увеличивает время перезарядки поверхностных состоя-

ний, и поверхностные состояния не должны успевать перезаряжаться на используемых в данной работе частотах переменного тестового сигнала [16].

Заключение

Таким образом, методом полной проводимости в широком диапазоне частот и температур исследованы электрофизические характеристики МДП-структур на основе гетероэпитаксиального МЛЭ $p\text{-Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$, который подвергался воздействию импульсов объемного наносекундного разряда в воздухе атмосферного давления, а также контрольных МДП-структур, изготовленных из той же (исходной) гетероэпитаксиальной пленки. Показано, что воздействие импульсов объемного наносекундного разряда в воздухе атмосферного давления существенно изменяет ВФХ МДП-структур, а также температурные зависимости дифференциального сопротивления ОПЗ в режиме сильной инверсии. Воздействие изменяет практически все параметры МДП-структур, связанные с диэлектриком, переходным слоем между диэлектриком и полупроводником, а также приповерхностного слоя полупроводника.

Наиболее яркой особенностью МДП-структур на основе $p\text{-HgCdTe}$, подвергнутого воздействию импульсов объемного наносекундного разряда в воздухе атмосферного давления, является значительное увеличение положительного фиксированного заряда в диэлектрике (в 10–50 раз). Для части образцов этот положительный фиксированный заряд индуцирует инверсионный слой в заэлектродных областях, который является источником неосновных носителей при формировании подэлектродного инверсионного слоя, что проявляется в крайне малых значениях дифференциального сопротивления ОПЗ в режиме сильной инверсии и в низкочастотном виде экспериментальных ВФХ на достаточно высоких частотах (например, на частоте 1 МГц при 40 и 77 К).

Воздействие импульсов объемного наносекундного разряда в воздухе атмосферного давления приводит к увеличению эффективной плотности подвижного заряда (в 2–17 раз) и появлению особенностей гистерезиса электрофизических характеристик, который определяется обменом носителей заряда между HgCdTe и состояниями в переходном слое. При этом особенности гистерезиса заключаются, например, в различии значений емкости в минимуме низкочастотной экспериментальной ВФХ при прямой и обратной развертке напряжения, в изменении соотношения крутизны наклонов емкостной зависимости в обеднении при прямой и обратной развертке напряжения, в особенностях частотной дисперсии ВФХ при прямой и обратной развертке напряжения. Воздействие импульсов объемного наносекундного разряда в воздухе атмосферного давления также приводит к увеличению средней плотности поверхностных состояний в обеднении до величины равной $4.1 \cdot 10^{12} \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$.

Следует отметить, что образцы, подвергнутые воздействию, демонстрируют значительный разброс основных параметров МДП-структур, то есть изменение свойств после воздействия импульсов объемного наносекундного разряда в воздухе атмосферного давления неоднородно по площади эпитаксиальной пленки, что вызвано, скорее всего, неоднородностью воздействия. Возможной причиной изменения характеристик МДП-структур после воздействия является существенная перестройка примесно-дефектной системы полупроводника вблизи границы раздела, которая сопровождается формированием на поверхности диэлектрической пленки нанометровой толщины, которая обладает положительным фиксированным зарядом.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИФП СО РАН В.С. Варавину, В.В. Васильеву, С.А. Дворецкому, Н.Н. Михайлову, Г.Ю. Сидорову, М.В. Якушеву за предоставленные структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rogalski A. // Opto-Electronics Review. – 2012. – V. 20. – No. 3. – P. 279–308.
2. Shulepov M.A., Tarasenko V.F., Goncharenko I.M., et al. // Tech. Phys. Lett. – 2008. – V. 34. – No. 4. – P. 296–299.
3. Alekseev S.B., Gubanov V.P., Kostyrya I.D., et al. // Quantum Electron. – 2004. – V. 34. – No. 11. – P. 1007–1010.
4. Войцеховский А.В., Григорьев Д.В., Коханенко А.П. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 10. – С. 88–90.
5. Войцеховский А.В., Григорьев Д.В., Коротаяев А.Г. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2014. – Т. 57. – № 10/3. – С. 126–130.
6. Fu R. and Pattison J. // Opt. Eng. – 2012. – V. 51. – No. 10. – P. 104003-(1-4).
7. Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Дзядух С.М. // Изв. вузов. Физика. – 2009. – Т. 52. – № 10. – С. 3–18.

8. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M., et al. // Opto-Electron. Rev. – 2014. – V. 22. – No. 4. – P. 236–244.
9. Колешко В.М., Каплан Г.Д. // Обзоры по электронной технике. Микроэлектроника. – 1977. – № 2(465). – 82 с.
10. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Энергия, 1973. – 656 с.
11. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M. // Thin Solid Films. – 2012. – V. 522C. – P. 261–266.
12. Войцеховский А.В., Давыдов В.Н. Фотоэлектрические МДП-структуры из узкозонных полупроводников. – Томск: Радио и связь, 1990. – 327 с.
13. Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Дзядух С.М. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2014. – Т. 57. – № 4. – С. 102–109.
14. Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Дзядух С.М. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2014. – Т. 57. – № 6. – С. 3–11.
15. Рогальский А. Инфракрасные детекторы: пер. с англ. под ред. А.В. Войцеховского. – Новосибирск: Наука, 2003. – 636 с.
16. Kinch M.A. // Semicond. Semimet. – 1981. – V. 18. – P. 313–385.
17. Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Дзядух С.М. и др. // ФТП. – 2008. – № 11. – С. 1327–1332.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия

E-mail: vav43@mail.tsu.ru

**Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 20.01.15.

Войцеховский Александр Васильевич, д.ф.-м.н., профессор;

Несмелов Сергей Николаевич, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;

Дзядух Станислав Михайлович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;

Григорьев Денис Валерьевич, к.ф.-м.н., доцент ТГУ, ст. науч. сотр. ИСЭ СО РАН;

Тарасенко Виктор Федотович, д.ф.-м.н., профессор, профессор ТГУ, зав. лаб. оптических излучений ИСЭ СО РАН;

Шулепов Михаил Александрович, к.ф.-м.н., мл. науч. сотр.