

ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СЛОИ И МНОГОСЛОЙНЫЕ КОМПОЗИЦИИ

УДК 621.315.592

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МДП–СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНОГО HgCdTe , ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНО–ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ, С НЕОДНОРОДНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ СОСТАВА*

© 2010 г. А. В. Войцеховский, С. Н. Несмелов, С. М. Дзядух
Сибирский физико–технический институт Томского государственного университета

Экспериментально исследованы электрофизические и фотоэлектрические свойства МДП–структур на основе HgCdTe , полученного методом молекулярно–лучевой эпитаксии, с неоднородным распределением состава. Показано, что для МДП–структур на основе $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21 \div 0,23$) приповерхностные варизонные слои с увеличенным содержанием CdTe на поверхности сильно влияют на зависимости емкости и фотоЭДС от напряжения смещения и частоты. Исследованы характеристики МДП–структур на основе $n\text{-Hg}_{0,7}\text{Cd}_{0,3}\text{Te}$ с периодически расположенными областями резко повышенного содержания CdTe барьерного типа и показано, что эти области оказывают влияние на характеристики МДП–структур при их расположении вблизи границы раздела диэлектрик–полупроводник. Экспериментально изучены электрические свойства МДП–структур на основе $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,62 \div 0,73$) с областями пониженного содержания CdTe в приповерхностной области типа потенциальных ям.

Ключевые слова: МДП–структура, теллурид кадмия ртути, состав, варизонный слой, барьерный слой, потенциальная яма, гетероэпитаксиальная структура.

Введение

Гетероэпитаксиальные структуры на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ могут быть выращены с заданным изменением состава по толщине эпитаксиальных пленок при использовании метода молекулярно–лучевой эпитаксии (МЛЭ). Экспериментальные исследования свойств МДП–структур (металл–диэлектрик–полупроводник) на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с неоднородным распределением состава (x) актуальны в связи с необходимостью пассивации поверхности фотодетекторов и излучателей инфракрасного диапазона на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, а также в связи с возможностью улучшения характеристик МДП–приборов оптоэлек-

троники на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ путем оптимизации изменения состава по толщине эпитаксиальной пленки. В настоящее время наиболее распространено создание варизонных слоев с увеличенным содержанием CdTe вблизи границ эпитаксиальной пленки, что позволяет снизить влияние поверхностной рекомбинации на время жизни носителей заряда в объеме эпитаксиальной пленки [1, 2]. Влияние таких приповерхностных варизонных слоев на электрофизические характеристики МДП–структур на основе $n(p)\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21 \div 0,23$) изучено достаточно подробно [3, 4] и показано, что наличие приповерхностных варизонных слоев существенно влияет на электрофизические и фотоэлектрические

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

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно–педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (ГК 02.740.11.0444, 02.740.11.0562), поддержана проектом в рамках АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2011 годы)» (рег. № 2.1.2/12459), а также грантом НШ–512.2012.2.

Исследования выполнены при поддержке ФЦП Министерства образования и науки Российской Федерации по соглашениям № 14.В37.21.0074, № 14.В37.21.1177 и ГК № 14.514.11.4050 и по Госзаданию, рег. № 2.4218.2011.

характеристики МДП-структур. В работе [5] экспериментально исследованы свойства МДП-структуры на основе n - $\text{Hg}_{0,75}\text{Cd}_{0,25}\text{Te}$ со сверхрешеткой CdTe/HgTe в приповерхностной области полупроводника и показано, что МДП-структуры можно успешно использовать для исследования свойств неоднородных по составу полупроводниковых систем на основе HgCdTe . Экспериментальные данные о влиянии неоднородного распределения состава на электрофизические и фотоэлектрические характеристики МДП-структур на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ немногочисленны. При этом необходимость исследования свойств таких структур обусловлена их использованием при разработке как излучателей [6], так и фотоприемников [7]. Наличие потенциальных ям и барьерных областей приводит к изменению не только спектральной характеристики, но и рекомбинационных свойств гетероэпитаксиальных структур.

Цель работы — экспериментальное исследование электрофизических и фотоэлектрических характеристик МДП-структур на основе гетероэпитаксиального HgCdTe , полученного методом МЛЭ, с неоднородным распределением содержания CdTe по толщине эпитаксиальной пленки.

Образцы и методы исследования

Исследуемые МДП-структуры изготавливали на основе HgCdTe , выращенного методом МЛЭ на подложках $\text{GaAs}(013)$. При выращивании гетероструктур на основе n - $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21 \div 0,23$) с обеих сторон рабочего слоя толщиной $5,2$ — $8,3$ мкм создавали варизонные слои с повышенным содержанием CdTe (толщина приповерхностного варизонного слоя составляла $0,25$ — $0,70$ мкм, причем значение x у поверхности достигало $0,43$ — $0,48$). На рис. 1, а показано типичное распределение состава x по толщине эпитаксиальной пленки n - $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21 \div 0,23$).

Для изучения влияния параметров варизонных слоев на электрофизические и фотоэлектрические характеристики МДП-структур на основе p - $\text{Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ исследовали структуры с толщиной приповерхностного варизонного слоя $1,6$ — $1,8$ мкм и различными составами на поверхности ($0,33$, $0,48$, $0,58$). На вставке рис. 1, а показано распределение x в приповерхностном слое для МДП-структур на основе p - HgCdTe с разными составами на поверхности.

Для установления влияния периодических областей с резко повышенным x (барьерные структуры) на электрические характеристики МДП-структур исследовали образцы на основе n - $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,292 \div 0,313$) с концентрацией основных носителей от $1,2 \cdot 10^{14}$ до $3,2 \cdot 10^{14}$ см $^{-3}$. В табл. 1 приведены некоторые геометрические параметры таких выращенных гетероструктур. Толщины буферных слоев ZnTe и CdTe составляли $0,1$ и $6,3$ мкм соответственно. Для сравнения электрофизических характеристик использовали близкий по составу образец 4, который не

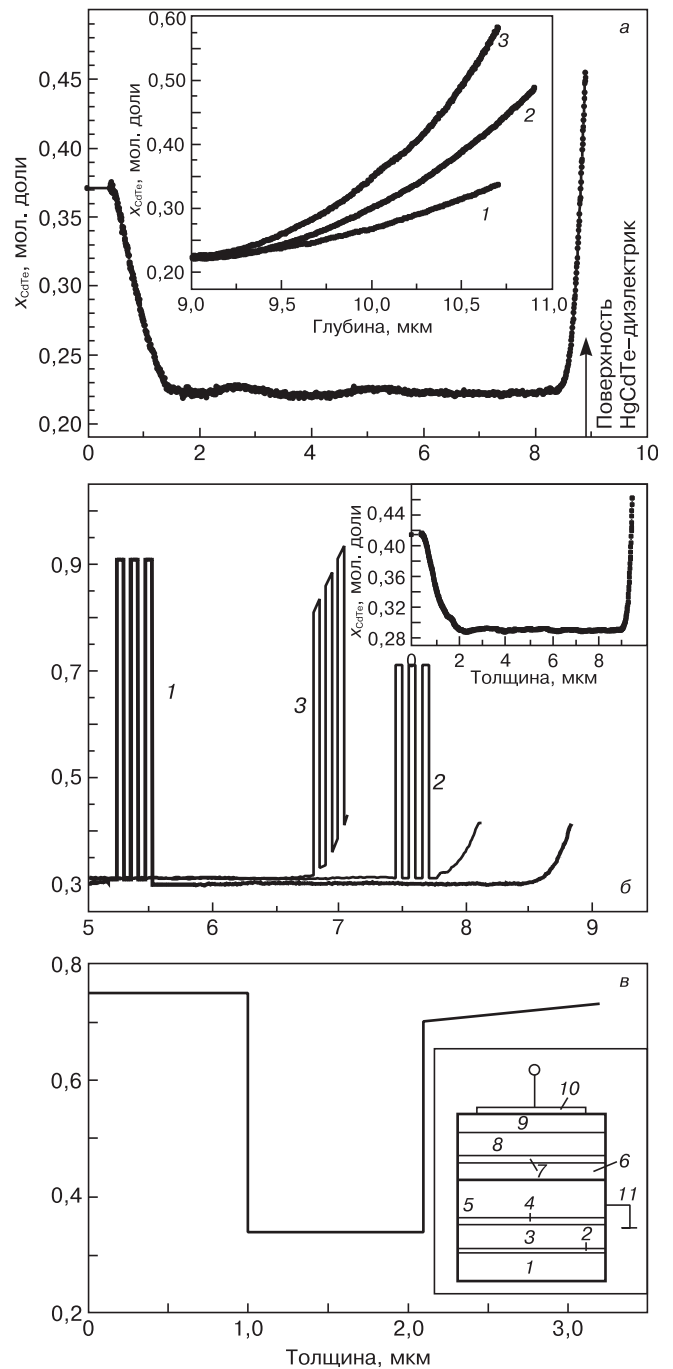


Рис. 1. Распределения состава x по толщине эпитаксиальных пленок исследованных структур на основе HgCdTe : а: для типичной МДП-структуры на основе n - $\text{Hg}_{0,77}\text{Cd}_{0,23}\text{Te}$. Вставка — распределение состава x в приповерхностном слое для МДП-структур на основе p - $\text{Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ с разными составами на поверхности (1 — $x = 0,33$; 2 — $0,48$; 3 — $0,58$); б: приповерхностные области структур 1 (1), 2 (2) и 3 (3) (см. табл. 1 и 2). Вставка — МДП-структура 4; в: структура 6 (см. табл. 3). Вставка — схематическое изображение МДП-структуры (1 — подложка из $\text{GaAs}(013)$; 2 — буферный слой из ZnTe ; 3 — буферный слой из CdTe ; 4 — нижний варизонный слой с повышенным составом; 5 — рабочий слой $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$; 6 — примерное расположение неоднородностей с резким изменением состава CdTe (для образца 1); 7 — верхний варизонный слой с повышенным составом CdTe ; 8 — слой SiO_2 ; 9 — слой Si_3N_4 ; 10 — полевой электрод из In ; 11 — тыловой контакт к эпитаксиальной пленке)

Таблица 1

Геометрические параметры гетероструктур на основе $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,29\div 0,31$) с периодическими областями с повышенным составом (барьерные области)

№ структуры	Количество барьеров, ед.	Ширина барьера, мкм	Толщина, мкм		
			нижнего варизонного слоя HgCdTe	рабочего слоя HgCdTe	верхнего варизонного слоя HgCdTe
1	3	0,06	2,1	5,9	0,3
2	3	0,05	2,0	5,5	0,3
3	3	0,06	1,5	5,2	0,3
4	—	—	2,0	7,0	0,4

Таблица 2

Электрические параметры гетероструктур на основе $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,29\div 0,31$) с периодическими областями с повышенным составом (барьерные области)

№ структуры	x , мол. доля	Концентрация электронов, 10^{14} см^{-3}	Подвижность электронов, $10^4 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	Проводимость, $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$	Время жизни, мкс
1	0,302	3,2	1,6	0,81	7—12
2	0,313	1,2	1,0	0,18	6—12
3	0,312	1,9	0,93	0,29	7—20
4	0,292	2	2,8	0,9	5,5—8

Таблица 3

Геометрические параметры гетероструктур на основе $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,62\div 0,73$), имеющих области с пониженным составом (потенциальные ямы)

Образец	Состав в яме, мол. доли	Толщина ямы, мкм	Состав в верхнем барьере, мол. доли	Толщина верхнего барьера, мкм	Состав в нижнем барьере	Толщина нижнего барьера, мкм
5	0,45	0,2	0,62	1,0	0,64	$\geq 1,0$
6	0,34	1,1	0,73	1,1	0,75	$\geq 1,0$

имел барьерных областей с резко повышенным составом x . Электрофизические параметры исследованных гетероструктур, определенные методом Холла при 78 К для однородных эпитаксиальных пленок (концентрации и подвижности основных носителей заряда), приведены в табл. 2. Там же приведены значения времени жизни неравновесных носителей при 78 К, измеренные бесконтактным СВЧ-методом. Для всех исследованных образцов в качестве диэлектрического покрытия использовали двухслойный диэлектрик $\text{SiO}_2\text{—Si}_3\text{N}_4$, созданный низкотемпературным плазмохимическим методом.

Распределения состава в приповерхностной области эпитаксиальных пленок 1—3, измеренные автоматическим эллипсометром в процессе роста, приведены на рис. 1, б. Показаны распределения состава для областей вблизи границы раздела с диэлектриком, отсчет координаты ведется от границы пленки с буферными слоями, расположенными между подложкой и пленкой. Из рис. 1, б видно, что

неоднородности с резким изменением состава CdTe в приповерхностной области расположены для образца 1 на расстоянии $\sim 3,3$ мкм, для образца 2 эти области находятся на расстоянии $\sim 0,42$ мкм от границы раздела с диэлектриком, начиная с границы между верхним варизонным слоем и рабочим слоем. Для образца 3 неоднородности с резким изменением состава расположены в верхнем варизонном слое, и расстояние от границы раздела до этих неоднородностей не превышает 0,03 мкм. Для образцов 1 и 2 в слоях с резко повышенным содержанием CdTe $x = 0,911$ и $0,713$ соответственно, при толщине этих слоев 53—54 нм и расстоянии между слоями с резко повышенным содержанием CdTe ~ 54 нм. Для образца 3 в областях с резкими неоднородностями состава значение x превышало на 0,494—0,525 аналогичную величину для верхнего варизонного слоя, толщины слоев с резко повышенным содержанием CdTe и расстояния между этими слоями составляли 47,9 нм. На вставке рис. 1, б для сравнения показано распределение состава по

толщине эпитаксиальной пленки для структуры 4 (без слоев с резко повышенным составом CdTe).

Также исследовали электрофизические и фотоэлектрические свойства МДП-структур на основе $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,62 \div 0,73$), имеющего области с пониженным составом CdTe ($x = 0,34 \div 0,45$) толщиной 0,2—1,1 мкм (потенциальные ямы). В табл. 3 приведены некоторые параметры выращенных гетероструктур с потенциальными ямами, определенные при помощи эллипсометрического метода. Толщина эпитаксиальных пленок в этой партии составила 2,2—3,5 мкм. На рис. 1, в показано распределение состава по толщине эпитаксиальной пленки для структуры 6. Для образца 5 концентрация электронов составляла $5,82 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, подвижность электронов — $5600 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, проводимость — $0,5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. Для образца 6 измерить параметры методом Холла не удалось из-за высокого сопротивления.

На вставке рис. 1, в показано схематическое изображение исследуемых МДП-структур.

Измеряли зависимости малосигнальной фотоЭДС от напряжения, частоты модуляции светового потока и температуры при освещении структур со стороны подложки излучением светодиода с длиной волны 0,94 мкм, а также вольт-фарадные характеристики (ВФХ) МДП-структур в диапазоне частот 2 кГц — 1 МГц. За прямое направление развертки принимали изменение напряжения от отрицательных значений к положительным, а за обратное направление — от положительных к отрицательным.

Методики измерения емкостных и фотоэлектрических характеристик МДП-структур, а также способы определения основных параметров диэлектриков, границ раздела диэлектрик—полупроводник и приповерхностных слоев полупроводников более подробно описаны в работе [8].

Результаты и их обсуждение

МДП-структуры на основе $n(p)\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21 \div 0,23$) с приповерхностными варизонными слоями с повышенным составом CdTe (см. рис. 1, а). Ранее было экспериментально исследовано влияние параметров приповерхностных варизонных слоев толщиной 0,25—0,70 мкм на фотоэлектрические и электрофизические характеристики МДП-структур на основе $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21 \div 0,23$) [3, 4]. Было установлено, что наличие приповерхностных варизонных слоев изменяет характер зависимостей фотоЭДС от напряжения и температуры для МДП-структур на основе $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, что связано с подавлением туннельной рекомбинации через ловушки в присутствии приповерхностных варизонных слоев [4]. Также создание приповерхностных варизонных слоев приводит к увеличению глубины и ширины «провала» на экспериментальных низкочастотных ВФХ, что связано с изменением условий генерации неосновных носителей при создании варизонных слоев [3]. Время релаксации

фотоответа, регистрируемое из частотных зависимостей фотоЭДС, увеличивается для МДП-структур на основе $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ при создании приповерхностных варизонных слоев в 2—4 раза по сравнению с МДП-структурами на основе однородных эпитаксиальных пленок [4]. При освещении МДП-структур со стороны подложки время релаксации фотоответа определяется процессами диффузии неравновесных носителей к области пространственного заряда (ОПЗ) и разделения носителей полем ОПЗ, а также постоянной времени $R_{\text{ОПЗ}}C_{\text{ОПЗ}}$, которая равна произведению сопротивления и емкости ОПЗ [8]. Увеличение времени релаксации фотоответа для МДП-структур на основе $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ при создании приповерхностных варизонных слоев, по-видимому, связано с увеличением дифференциального сопротивления ОПЗ. Установлено, что для МДП-структур на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, полученного методом МЛЭ, с диэлектриками типа анодно-оксидной пленки или $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ создание варизонного слоя вызывает увеличение гистерезиса ВФХ, что связано с увеличением плотности подвижного заряда в диэлектрике [3, 9]. Плотность подвижного заряда в диэлектрике оценивали в работах [3, 9] по сдвигу ВФХ, измеренных при прямой и обратной развертке напряжения, при напряжении плоских зон. Свойства границ раздела варизонного HgCdTe с различными диэлектрическими покрытиями, а также идеальные ВФХ МДП-структур на основе HgCdTe с приповерхностными варизонными слоями описаны, например, в работе [3].

На рис. 2, а приведены ВФХ МДП-структур на основе $p\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ с различным составом на поверхности (см. вставку рис. 1, а), измеренные на частоте 10 кГц. Из рис. 2, а видно, что при увеличении состава на поверхности (от 0,33 до 0,48—0,58) при толщине верхнего варизонного слоя 1,6—1,8 мкм для МДП-структур на основе $p\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ ВФХ принимают высокочастотный вид на частотах 10 кГц и выше, что связано с увеличением дифференциального сопротивления ОПЗ. В отсутствие варизонного слоя ВФХ таких структур имеют низкочастотный вид при частотах тестового сигнала до 1 МГц. Экспериментальные исследования ВФХ МДП-структур на основе $p\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ с варизонными слоями близкой толщины и составом на поверхности в диапазоне от 0,33 до 0,48 пока не проведены, но можно ожидать также уменьшения частоты перехода от низкочастотного к высокочастотному виду ВФХ при увеличении состава на поверхности.

На рис. 2, б приведены зависимости фотоЭДС от напряжения смещения для МДП-структур на основе $p\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ с различным составом на поверхности. Из рис. 2, б видно, что увеличение состава на поверхности изменяет зависимость фотоЭДС от напряжения смещения: исчезает спад фотоЭДС в инверсии, что может быть вызвано подавлением межзонной туннельной рекомбинации в ОПЗ, которая ограничивает дифференциальное сопротивление

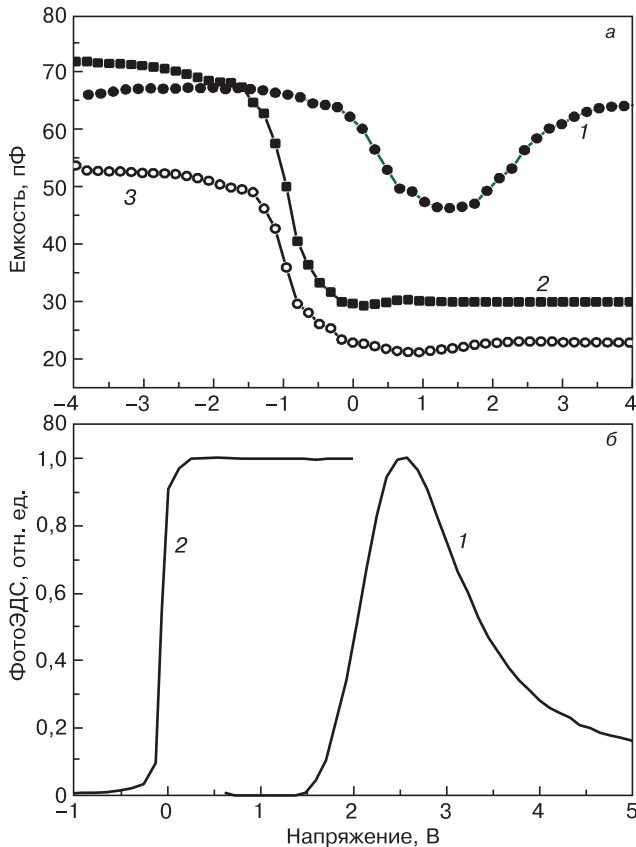


Рис. 2. ВФХ ($f = 10$ кГц) (а) и зависимости фотоЭДС от напряжения (частота модуляции 5 кГц) (б), измеренные при прямой развертке напряжения, для МДП-структур на основе $p\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ с различным составом на поверхности варизонных слоев x_s , мол. доли:
 а: 1 — 0,33; 2 — 0,48; 3 — 0,58;
 б: 1 — 0,33; 2 — 0,58

ОПЗ в таких структурах на основе $p\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ без варизонного слоя [8]. Для МДП-структур на основе $p\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ без варизонного слоя при концентрации основных носителей в диапазоне от 10^{15} до 10^{16} см^{-3} максимальная ширина ОПЗ изменяется от $\sim 0,33$ до $\sim 0,12$ мкм. Из приведенных результатов следует, что если ОПЗ находится внутри варизонного слоя (толщина слоя составляет 1,6—1,8 мкм), то электрофизические и фотоэлектрические характеристики МДП-структур на основе $p\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ определяются в основном параметрами варизонного слоя.

МДП-структуры на основе $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,29 \div 0,31$) с периодически расположенными областями с резко повышенным составом CdTe (см. рис. 1, б). На рис. 3, а приведены ВФХ МДП-структур 1—4, измеренные при прямой развертке напряжения на частоте 10 кГц. Для всех исследованных образцов гистерезис был очень мал, и ВФХ при обратной развертке практически не отличались от соответствующих кривых при прямой развертке. На частоте 10 кГц ВФХ всех образцов имеют вид, близкий к низкочастотному. Из рис. 3, а видно, что емкость МДП-структуры 3 на частоте 10 кГц принимает в обогащении значения меньшие, чем в сильной инверсии, хотя, согласно теории однородных МДП-структур, емкость в обогащении

должна быть максимальна и равна емкости диэлектрика. Такое же соотношение емкостей в обогащении и сильной инверсии для структуры 3 наблюдали и на более низких частотах 2 и 5 кГц. При увеличении частоты до 200 кГц емкость в обогащении значительно уменьшается (примерно на 10 пФ) только для образца 3, что связано с влиянием на измеряемую емкость сопротивления объема эпитаксиальной пленки [10]. Для остальных образцов проводимость эпитаксиальной пленки достаточно высока, и на частоте 200 кГц сопротивление объема эпитаксиальной пленки незначительно влияет на измеряемую емкость в обогащении. Для структуры 2 наблюдали появление максимумов на ВФХ при освещении инфракрасным излучением с длиной волны 0,94 мкм (рис. 3, б), которые могут быть связаны с перезарядкой глубоких уровней в ОПЗ [3].

На рис. 4, а приведены экспериментальные зависимости фотоЭДС от напряжения смещения для образцов 1—4 при прямой развертке напряжения на частоте модуляции 5 кГц. Из рис. 4, а видно, что для структур 1 и 3 вид фотоЭДС близок к классическому. Для МДП-структуры 2 наблюдается спад фотоЭДС в режиме сильной инверсии, который для $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,20 \div 0,23$) обычно связывают с туннельной рекомбинацией через глубокие уров-

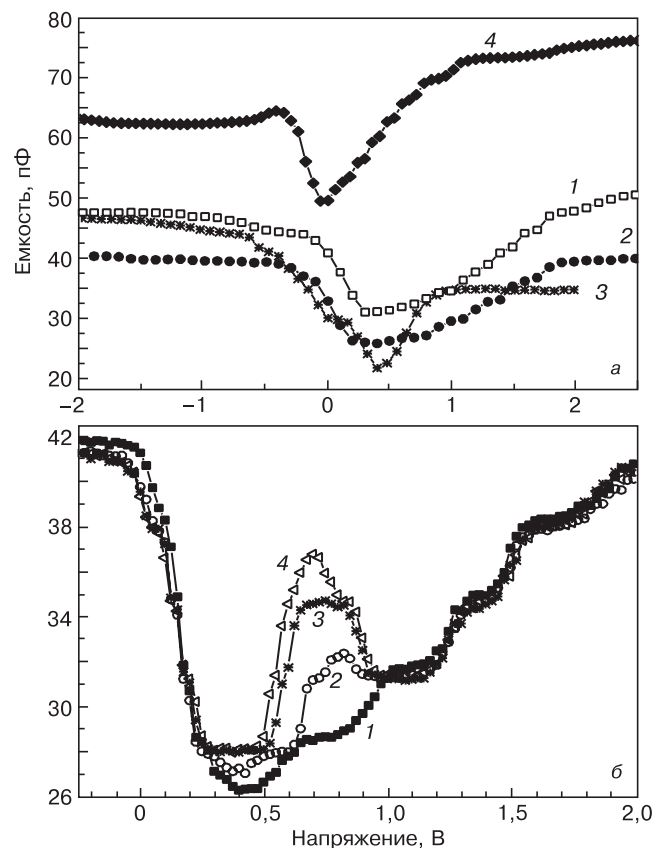


Рис. 3. ВФХ МДП-структур, измеренные на частоте 10 (а) и 2 (б) кГц при прямой развертке напряжения:
 а: 1 — структура 1; 2 — 2; 3 — 3; 4 — 4 (см. табл. 1 и 2);
 б: измерения проводили для структуры 2 при разных уровнях фронтальной засветки инфракрасным излучением с длиной волны 0,94 мкм; рост интенсивности засветки от $I = 0$ (1) до I_{max} (1—4)

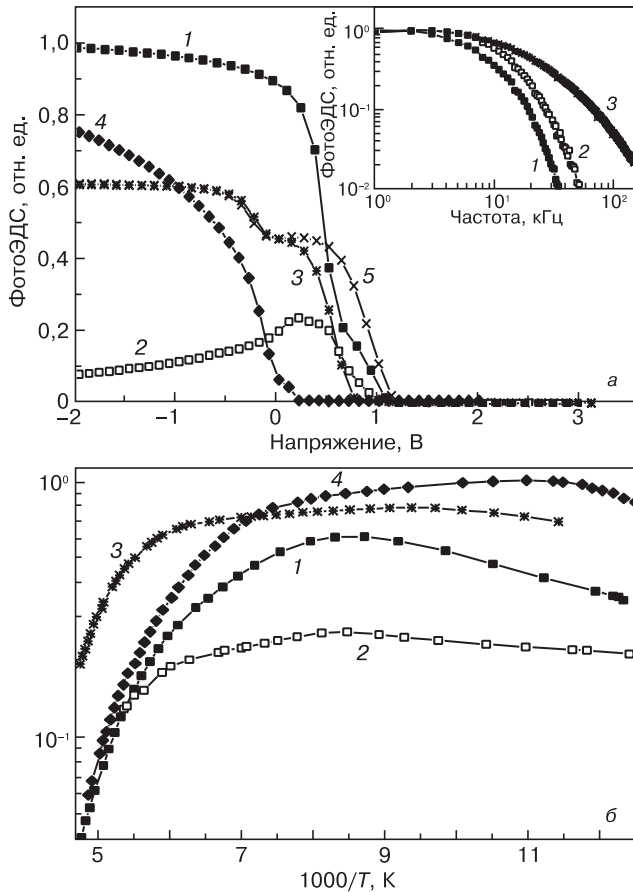


Рис. 4. Зависимости фотоЭДС от напряжения смещения (а) и обратной температуры (б), измеренные на частоте модуляции 5 кГц:
 а: 1 — МДП-структуры 1; 2 — 2; 3, 5 — 3; 4 — 4 (см. табл. 1 и 2).
 Кривые 1—4 измерены при прямой развертке напряжения, кривая 5 — при обратной развертке напряжения. Вставка — нормированные зависимости фотоЭДС от частоты модуляции светового потока для МДП-структур 1, 2 и 3, измеренные при напряжении, соответствующем сильной инверсии;
 б: 1 — МДП-структуры 1; 2 — 2; 3 — 3; 4 — 4.
 Зависимости измерены при напряжении, соответствующем сильной инверсии

ни. Некоторый гистерезис наблюдается только для структуры 3, для остальных МДП-структур характеристики при прямой и обратной развертке напряжения совпадают. Исследованы частотные зависимости фотоЭДС при 78 К для МДП-структур 1—3 (см. вставку рис. 4, а). Время релаксации фототока, определенное по высокочастотному спаду фотоЭДС в сильной инверсии, для структуры 1 составило 31 мкс, для структуры 2 — ~20 мкс, а для структуры 3 — 15 мкс.

На рис. 4, б приведены зависимости фотоЭДС от обратной температуры для МДП-структур 1—4. Все характеристики существенно отличаются от температурных зависимостей фотоЭДС для МДП-структур без «барьерных» областей на основе HgCdTe с $x = 0,21 \div 0,23$ [4] тем, что спад фотоЭДС наблюдается при значительно более высоких температурах. В случае наличия «барьеров» в варизонном слое (структура 3) высокотемпературный спад фотоЭДС

происходит при несколько более высоких температурах, чем для МДП-структур с более дальним расположением областей с резко неоднородным распределением состава CdTe от границы раздела с диэлектриком (структуры 1 и 2).

МДП-структуры на основе $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,62 \div 0,73$) с областями пониженного состава (рис. 1, в). Экспериментально исследованы ВФХ и фотоэлектрические характеристики МДП-структур с потенциальными ямами. На рис. 5, а приведены зависимости фотоЭДС от частоты модуляции светового потока, измеренные при 78 и 296 К. Из рис. 5, а видно, что время релаксации фототока при 78 К существенно больше, чем при 296 К (70 мкс и 3,4 мкс соответственно). При этом полевые зависимости фотоЭДС при 78 К имеют вид, близкий к классическому. На рис. 5, б приведены ВФХ МДП-структур, измеренные при температуре 78 К. Из рис. 5, б видно, что для большинства МДП-структур характерен достаточно необычный вид ВФХ. Установлено наличие значительного различия хода ВФХ и полевых зависимостей фотоЭДС при различных направлениях развертки напряжения. Выдержка структуры при

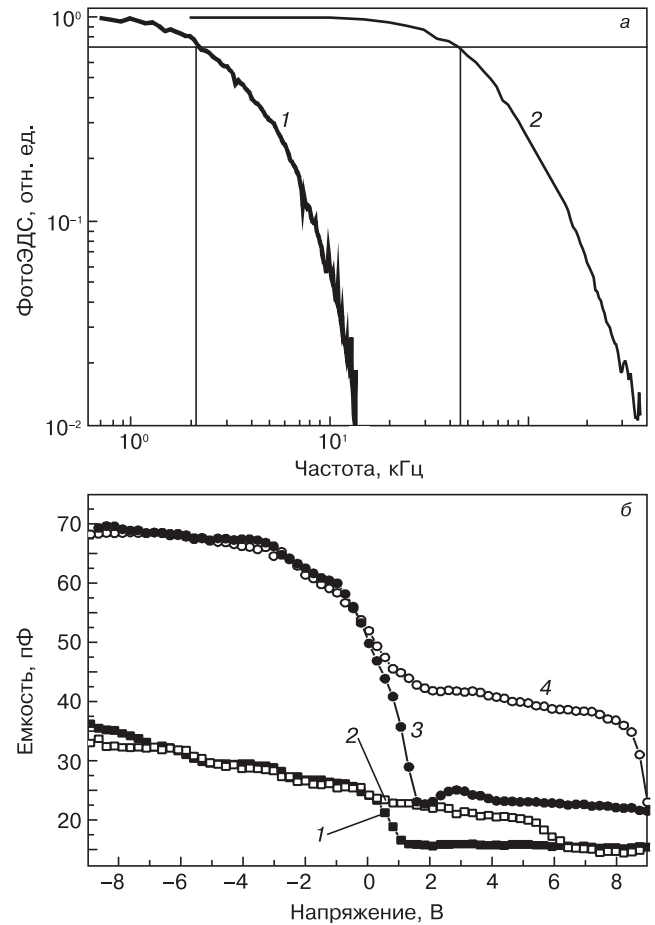


Рис. 5. Зависимости фотоЭДС от частоты модуляции в сильной инверсии для МДП-структуры 5 (а) и ВФХ МДП-структуры 6 на частоте 5 кГц (б):
 а: 1 — при температуре 78 К; 2 — 296 К;
 б: 1, 3 — прямая развертка; 2, 4 — обратная развертка;
 1, 2 — измерены в темноте; 3, 4 — при фронтальной засветке инфракрасным излучением ($\lambda = 0,94$ мкм).
 Измерения проводили при температуре 78 К

положительных напряжениях приводит к смещению части ВФХ в область положительных напряжений, что может быть связано с накоплением в диэлектрике отрицательного заряда. Подсветка при 300 К не вызывает заметного изменения вида ВФХ. При низкой температуре 78 К сильное влияние на вид ВФХ оказывает подсветка инфракрасным излучением светодиода со стороны подложки или с фронтальной стороны (см. рис. 5, б), что, возможно, связано с перезарядкой энергетических состояний в потенциальной яме.

Заключение

Экспериментально исследованы электрофизические и фотоэлектрические характеристики полученных методом МЛЭ МДП-структур на основе $n(p)\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21\div 0,23$) с приповерхностными варизонными слоями с повышенным составом CdTe, а также на основе $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,29\div 0,31$), имеющего периодические области с резко повышенным составом CdTe (барьерного типа), и на основе $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,64\div 0,73$) с областями пониженного состава (потенциальные ямы).

Показано, что создание приповерхностного варизонного слоя приводит к изменению низкочастотной ВФХ МДП-структур на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$: емкость в минимуме ВФХ принимает меньшие значения, а провал емкости становится более широким. Это связано с изменением зависимости концентрации неосновных носителей заряда от напряжения из-за уменьшения собственной концентрации носителей заряда в приповерхностном варизонном слое. Для МДП-структур на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с диэлектриками типа анодно-оксидной пленки или $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ создание варизонного слоя вызывает увеличение плотности подвижного заряда в диэлектрике. Создание приповерхностного варизонного слоя существенно изменяет фотоэлектрические характеристики МДП-структур на основе гетероэпитаксиального $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,21\div 0,23$), что связано с подавлением туннельной генерации через глубокие уровни в ОПЗ. Создание варизонного слоя также увеличивает время релаксации фотоответа, определяемое из измерений зависимости фотоЭДС от частоты, что может быть связано с увеличением дифференциального сопротивления ОПЗ.

Установлено, что для МДП-структур на основе варизонного $p\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ при увеличении состава на поверхности от 0,33 до 0,48—0,58 при толщине варизонного слоя 1,6—1,8 мкм наблюдается увеличение дифференциального сопротивления ОПЗ. Это проявляется в переходе ВФХ, измеренной на частоте 10 кГц, к высокочастотному виду, а также происходит подавление межзонной туннельной рекомбинации, что следует из перехода зависимости фотоЭДС от напряжения к «классическому» виду.

Показано, что наибольшее влияние на электрофизические и фотоэлектрические характеристики МДП-структур на основе $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,29\div 0,31$) оказывают периодические (барьерные) области с рез-

ко повышенным составом CdTe, расположенные непосредственно вблизи границы раздела диэлектрик—полупроводник. Это влияние заключается в увеличении эффективной толщины диэлектрика, что может быть вызвано образованием потенциальных барьеров для электронов областями повышенного состава, а также в уменьшении постоянной времени фотоответа, что может быть связано с рекомбинацией на границах областей с резким изменением состава.

Установлено, что для МДП-структур на основе $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,62\div 0,73$) с областью пониженного состава (потенциальной ямой) наблюдается значительный гистерезис электрических характеристик. Причем вид ВФХ сильно зависит от наличия подсветки инфракрасным излучением с фронтальной или обратной стороны подложки.

Показано, что целенаправленное изменение состава CdTe в гетероэпитаксиальной структуре $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ (создание варизонных слоев, барьерных слоев и потенциальных ям) позволяет реализовать электрофизические и фотоэлектрические характеристики МДП-структур на их основе, необходимые для создания как фоточувствительных элементов, так и элементов сдвиговых регистров фотоприемных устройств инфракрасного диапазона (наблюдается увеличение времени релаксации фотоответа, уменьшение туннельных токов в приповерхностной области полупроводника, увеличение значения дифференциального сопротивления ОПЗ).

Библиографический список

1. Овсяк, В. Н. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона. / В. Н. Овсяк, Г. Л. Курьшев, Ю. Г. Сидоров и др. – Новосибирск : Наука, 2001. – 376 с.
2. Войцеховский, А. В. Время жизни носителей заряда в структурах на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,22$), выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии / А. В. Войцеховский, Ю. А. Денисов, А. П. Коханенко, В. С. Варавин, С. А. Дворецкий, В. Т. Либберман, Н. Н. Михайлов, Ю. Г. Сидоров // Физика и техника полупроводников. – 1997. – № 7. – С. 774—776.
3. Войцеховский, А. В. Свойства МДП структур на основе варизонного HgCdTe , выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии / А. В. Войцеховский, С. Н. Несмелов, С. М. Дзядух, В. С. Варавин, С. А. Дворецкий, Н. Н. Михайлов, Ю. Г. Сидоров, В. В. Васильев // Там же. – 2008. – № 11. – С. 1327—1332.
4. Войцеховский, А. В. Фотоэлектрические характеристики МДП-структур на основе варизонного $n\text{-HgCdTe}$ ($x = 0,21\div 0,23$) / А. В. Войцеховский, С. Н. Несмелов, С. М. Дзядух, В. С. Варавин, С. А. Дворецкий, Н. Н. Михайлов, Ю. Г. Сидоров, В. В. Васильев, Т. И. Захарьяш, Ю. П. Машуков // Изв. вузов. Физика. – 2006. – № 10. – С. 70—80.
5. Goodwin, M. W. Metal-insulator-semiconductor properties of $\text{HgTe}\text{—CdTe}$ superlattices» / M. W. Goodwin, M. A. Kinch, R. J. Koestner // J. Vacuum Sci. and Technol. – 1988. – V. 6, Iss. 4. – P. 2685—2692.
6. Мынбаев, К. Д. Фотоломинесценция наногетероструктур на основе CdHgTe / К. Д. Мынбаев, Н. Л. Баженов, В. И. Иванов-Омский, А. В. Шилияев, В. С. Варавин, Н. Н. Михайлов, С. А. Дворецкий, Ю. Г. Сидоров // Письма в ЖЭТФ. – 2010. – Т. 36, № 23. – С. 70—77.
7. Пат. 2373606 РФ, МПК H01L 31/0296. Фоточувствительная структура / Ю. Г. Сидоров, С. А. Дворецкий, В. С. Варавин, Н. Н. Михайлов; заявитель и патентообладатель ИФП СО РАН. – № 2008138804/28; Заявл. 29.09.2008; Опубл. 20.11.2009.
8. Войцеховский, А. В. Фотоэлектрические МДП-структуры из узкозонных полупроводников / А. В. Войцеховский, В. Н. Давыдов. – Томск : Радио и связь, 1990. – 327 с.

9. **Voitsekhovskii, A.** Influence of near-surface graded-gap layers on electrical characteristics of MIS-structures based on MBE grown HgCdTe / A. Voitsekhovskii, S. Nesmelov, S. Dzyadukh, V. Varavin, S. Dvoretzskii, N. Mikhailov, Y. Sidorov, M. Yakushev // Opto-Electronics Rev. – 2010. – V. 18, N 3. – P. 259–262.

10. **Войцеховский, А. В.** Влияние сопротивления объема эпитаксиальной пленки на вольт-фарадные характеристики МДП-структур HgCdTe/AOP и HgCdTe/SiO₂/Si₃N₄ / А. В. Войцеховский, С. Н. Несмелов, С. М. Дзядх // Изв. вузов. Физика. – 2005. – № 6. – С. 31–37.

УДК 621.315.592

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ РОСТА НА СТРУКТУРНОЕ СОВЕРШЕНСТВО СЛОЕВ AlN, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МОС–ГИДРИДНОЙ ЭПИТАКСИИ

© 2012 г. **А. В. Мазалов¹, Д. Р. Сабитов¹, В. А. Курешов¹,
А. А. Падалица¹, А. А. Мармалюк^{1,2}, Р. Х. Акчурин²**
¹ООО «Сигм Плюс»,
²МИТХТ им. М. В. Ломоносова

Рассмотрено влияние буферных слоев, формируемых при различных температурах и отношениях элементов V и III групп (V/III), на кристаллическое совершенство эпитаксиальных слоев AlN, выращенных методом МОС–гидридной эпитаксии на подложках α -Al₂O₃. Показано, что наиболее эффективным способом повышения структурного совершенства эпитаксиальных слоев является использование высокотемпературного буферного слоя при низком отношении V/III. Дальнейшее улучшение качества слоев AlN возможно благодаря снижению паразитных реакций между аммиаком и триметилалюминием в газовой фазе путем оптимизации потока газа через реактор. Установленные значения ростовых параметров, позволили получить слои AlN высокого кристаллического совершенства (полуширина рентгеновских кривых качания для отражений (0002), (0004) и (10 $\bar{1}$ 3) составила 50, 97 и 202 угл. с соответственно) с хорошей среднеквадратической шероховатостью поверхности 0,7 нм, пригодные для создания приборов на их основе.

Ключевые слова: нитрид алюминия, МОС–гидридная эпитаксия, отношение V/III, буферный слой, сапфир.

Введение

Благодаря большой ширине запрещенной зоны (~6,2 эВ), высокой теплопроводности, химической и термической стабильности эпитаксиальные слои AlN перспективны для производства высокоомощных полевых транзисторов и оптоэлектронных приборов, работающих в ультрафиолетовом диапазоне.

На сегодняшний день самым распространенным подложечным материалом для выращивания эпитаксиальных структур на основе нитридов III группы, является сапфир (α -Al₂O₃). Сапфировые подложки дешевы в производстве и широкодоступны, имеют высокое кристаллическое совершенство, обладают необходимой химической и термической стойкостью. Сапфир прозрачен во всем видимом и ближнем ультрафиолетовом диапазонах длин волн, что позволяет создавать электронно–оптические приборы с вводом и выводом излучения через подложку. Самым существенным недостатком этих подложек является сильное несоответствие периодов кристаллических решеток сапфира и нитридов III группы, что затрудняет прямое получение эпитаксиальных слоев с высоким структурным совершенством. В случае GaN эта проблема решается путем

осаждения низкотемпературного зародышевого слоя GaN или AlN на начальной стадии роста [1, 2]. Далее при повышении температуры этот слой перекристаллизовывается и затем продолжается рост GaN при высокой температуре. Использование низкотемпературного буферного слоя для улучшения кристаллического качества AlN является менее эффективным из-за пониженной, по сравнению с GaN, подвижности атомов алюминия на поверхности растущего слоя даже при высоких температурах [3].

Кроме того, получение высококачественных слоев AlN в условиях химического осаждения металлоорганических соединений из газовой фазы (МОС–гидридной эпитаксии) осложняется наличием паразитных реакций между аммиаком (NH₃) и триметилалюминием (ТМА1) в газовой фазе с образованием частиц AlN. Они ухудшают структурное совершенство материала и существенно снижают скорость роста [4]. Предложен ряд подходов, позволяющих в той или иной степени устранить перечисленные выше недостатки [5–7]. В основном эти подходы связаны с подбором оптимальных начальных условий и режимов роста, а также с использованием различных буферных слоев. Ниже рассмотрено влияние начальных условий роста и