

# Фотоэлектроника: элементная база и технология

УДК 621.315

## Исследование электрофизических свойств МДП-структур на основе ГЭС КРТ МЛЭ

А. В. Войцеховский, С. Н. Несмелов, С. М. Дзядх, В. В. Васильев, В. С. Варавин,  
С. А. Дворецкий, Н. Н. Михайлов, Ю. Г. Сидоров, Ю. П. Машуков, М. В. Якушев

*Проведены экспериментальные исследования электрофизических характеристик МДП-структур на основе  $\text{HgCdTe/CdTe}$ ,  $\text{HgCdTe/CdTe/SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$  и  $\text{HgCdTe/CdTe/ZnTe}$ . Для всех структур были определены значения плотностей фиксированного и подвижного зарядов в диэлектрике, а также рассчитана плотность поверхностных состояний вблизи середины запрещенной зоны. Показано, что наилучшая граница раздела наблюдается при использовании в качестве функционального диэлектрика  $\text{CdTe}$ , сформированного в процессе выращивания гетероэпитаксиальных структур.*

PACS: 73.40.Qv; 72.80. Sk; 73.20.-r; 73.21.Ac

*Ключевые слова:* МДП-структура, теллурид кадмия ртути, электрофизические характеристики.

### Введение

В настоящее время узкозонный твердый раствор  $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$  (КРТ) является основным материалом для создания высокочувствительных инфракрасных фотодиодов для спектральных диапазонов 3—5 и 8—12 мкм [1—3]. Использование метода молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) предоставляет возможности создания варизонных пленок  $\text{HgCdTe}$ , т. е. пленок с заданными профи-

лями распределения по толщине эпитаксиальной пленки компонентного состава. Приповерхностные широкозонные слои используются для увеличения времени жизни неосновных носителей заряда в объеме КРТ за счет исключения влияния поверхностной рекомбинации.

Для повышения стабильности свойств гибридных матриц фокальной плоскости на основе фотодиодов из  $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$  необходима пассивация поверхности КРТ диэлектрическими покрытиями. Параметры матричных фотоприемников в значительной степени зависят от качества границы раздела полупроводник—диэлектрик. Важнейшими характеристиками границы раздела с пассивирующим диэлектриком являются плотности фиксированного и подвижного зарядов, а также плотность поверхностных состояний. В настоящее время ведутся исследования различных диэлектрических покрытий, которые должны обеспечивать наилучшие параметры границы раздела. При этом традиционные методики, разработанные для исследования свойств границ раздела в МДП-структурах с однородным по ширине запрещенной зоны полупроводником, не подходят для исследования свойств МДП-структур на основе варизонных полупроводников.

В данной работе приводятся результаты экспериментальных исследований свойств границ раз-

---

Войцеховский Александр Васильевич, зав. отделением.  
Несмелов Сергей Николаевич, старший научный сотрудник.  
Дзядх Станислав Михайлович, младший научный сотрудник.  
Обособленное структурное подразделение "Сибирский физико-технический институт Томского государственного университета".  
Россия, 634050, Томск, пл. Новособорная, 1.  
E-mail: vav@elefot.tsu.ru  
Васильев Владимир Васильевич, зав. лабораторией.  
Варавин Василий Семенович, старший научный сотрудник.  
Дворецкий Сергей Алексеевич, ведущий научный сотрудник.  
Михайлов Николай Николаевич, старший научный сотрудник.  
Сидоров Юрий Георгиевич, зав. отделом.  
Машуков Юрий Петрович, ведущий инженер.  
Якушев Максим Витальевич, старший научный сотрудник.  
Институт физики полупроводников СО РАН.  
Россия, 630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13.  
E-mail: dvor@isp.nsc.ru

Статья поступила в редакцию 12 января 2010 г.

---

© Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Дзядх С. М., Васильев В. В., Варавин В. С., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Сидоров Ю. Г., Машуков Ю. П., Якушев М. В., 2010

дела в МДП-структурах на основе HgCdTe/CdTe, HgCdTe/CdTe/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> и HgCdTe/CdTe/ZnTe, причем CdTe использовался в качестве функционального диэлектрика и формировался в процессе выращивания гетероэпитаксиальных структур.

### Образцы и методики эксперимента

Исследуемые МДП-структуры изготавливались на основе HgCdTe дырочного и электронного типов проводимости, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках из GaAs. При выращивании гетероэпитаксиальных структур с обеих сторон рабочего слоя (толщина 6,4—8,65 мкм, состав 0,223—0,229; 0,323—0,347) создавались варизонные слои с повышенным компонентным составом CdTe (толщина приповерхностного варизонного слоя 0,3—0,7 мкм, причем состав у поверхности достигал 0,43—0,48). Перед нанесением диэлектрических покрытий методом Холла определялись электрические параметры материала, а время жизни неосновных носителей  $\tau$  определялось методом релаксации фотосигнала с помощью бесконтактной СВЧ-методики.

Для исследованных образцов *n*-HgCdTe подвижность основных носителей изменялась от 5600 до 55 000 см<sup>2</sup>(В<sup>-1</sup>·с<sup>-1</sup>), время жизни от 2,5 до 25 мкс, концентрация основных носителей от 8,7·10<sup>13</sup> до 2,7·10<sup>14</sup> см<sup>-3</sup>. Для образцов *p*-типа ( $x = 0,22$ ) подвижность основных носителей изменялась от 470 до 560 см<sup>2</sup>(В<sup>-1</sup>·с<sup>-1</sup>), время жизни не превышало 75 нс, концентрация основных носителей составляла 2,6·10<sup>15</sup>—1,1·10<sup>16</sup> см<sup>-3</sup>. Исходная проводимость для исследованных образцов изменялась от 0,12 до 2,6 Ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup>. Основные электрические параметры гетероэпитаксиальных структур приведены в табл. 1, а примеры распределения состава по толщине эпитаксиальной пленки показаны на рис. 1. Структуры № 1, 4—6 имели электронный тип проводимости, а структуры № 2, 3 — дырочный тип проводимости.

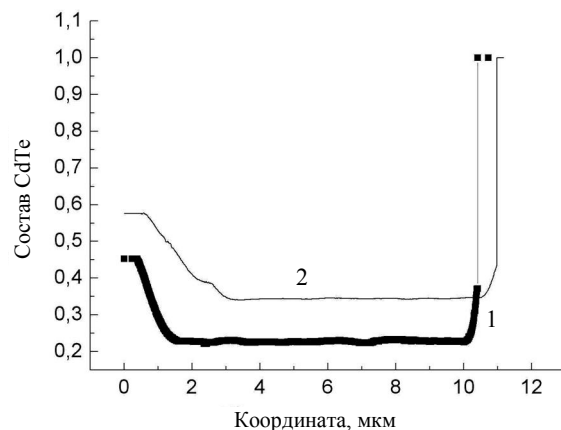


Рис. 1. Примеры распределения состава по толщине эпитаксиальной пленки:  
1 — образец № 3; 2 — образец № 4

В табл. 1 использованы следующие обозначения:  $x$ —состав CdTe в рабочем слое HgCdTe,  $n(p)$ —концентрация основных носителей (гальваномагнитные измерения проводились при магнитной индукции  $B = 0,05$  Тл),  $\mu$  — подвижность основных носителей,  $\sigma$  — проводимость,  $\tau$  — время жизни неосновных носителей,  $d$  — толщина рабочего слоя структуры HgCdTe,  $d_1$  — толщина верхнего варизонного слоя HgCdTe.

В качестве пассивирующего покрытия для структур № 1—3 использовался CdTe, а также многослойный диэлектрик CdTe/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Для образцов № 5, 6 в качестве защитного покрытия использовался ZnTe, причем слой ZnTe располагался сверху слоя CdTe. Для образца № 4 в качестве защитного покрытия использовался только CdTe.

При создании двухслойного диэлектрика SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> температура подложки не превышала 100 °С, толщина слоя SiO<sub>2</sub> составляла 70 нм, толщина Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> — 30 нм. Тыловой контакт создавался на поверхности эпитаксиальной пленки после локального удаления диэлектрика, в качестве полевого электрода использовались площадки из In, нанесенного методом термического напыления.

Таблица 1

Исходные параметры гетероэпитаксиальных структур

Номер структуры	$x$	$n(p)$ , см <sup>-3</sup>	$\mu$ , см <sup>2</sup> (В <sup>-1</sup> ·с <sup>-1</sup> )	$\sigma$ , Ом <sup>-1</sup> ·см <sup>-1</sup>	$\tau$ , мкс	$d$ , мкм	$d_1$ , мкм
1	0,229	2,7·10 <sup>14</sup>	55000	2,6	16—18	8,1	0,35
2	0,223	2,6·10 <sup>15</sup>	560	0,24	0,02—0,03	8,65	0,35
3	0,227	1,1·10 <sup>16</sup>	470	0,85	0,05—0,075	8,6	0,3
4	0,343	8,7·10 <sup>13</sup>	11000	0,15	13—20	7,5	0,4
5	0,347	1,3·10 <sup>14</sup>	5600	0,12	14—27	6,4	0,4
6	0,324	1,9·10 <sup>14</sup>	14000	0,43	2,5—3,5	6,8	0,7

В ходе экспериментальных исследований измерялись вольт-фарадные характеристики (ВФХ) МДП-структур на разных частотах. Методики исследований описаны в работе [3]. За прямое направление развертки принималось изменение напряжения от отрицательных значений к положительным, а за обратное направление — от положительных к отрицательным. Скорость изменения напряжения смещения при измерениях не превышала 0,015 В/с.

### ВФХ МДП-структур с различными диэлектрическими покрытиями

На рис. 2 приведены ВФХ МДП-структуры для узкозонного  $p$ -HgCdTe/CdTe для структуры № 2, измеренные на разных частотах тестового сигнала. Из рисунка видно, что на частотах 10—200 кГц ВФХ имеют вид, близкий к низкочастотному, а на частоте 1 МГц наблюдается вид ВФХ, близкий к высокочастотному. Уменьшение на высоких частотах емкости МДП-структуры в обогащении связано с влиянием сопротивления объема эпитаксиальной пленки КРТ на измеряемую емкость при использовании параллельной схемы замещения. На рис. 3 показаны ВФХ для МДП-структуры № 2 с CdTe/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, измеренные при разных направлениях развертки напряжения, а также на разных частотах. Из рисунка видно, что на частоте 10 кГц наблюдается вид ВФХ, близкий к высокочастотному, а на частоте 1 МГц вид ВФХ близок к высокочастотному. Различие в величинах емкости МДП-структур на рис. 2 и 3 связано с использованием разных диэлектриков CdTe и CdTe/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

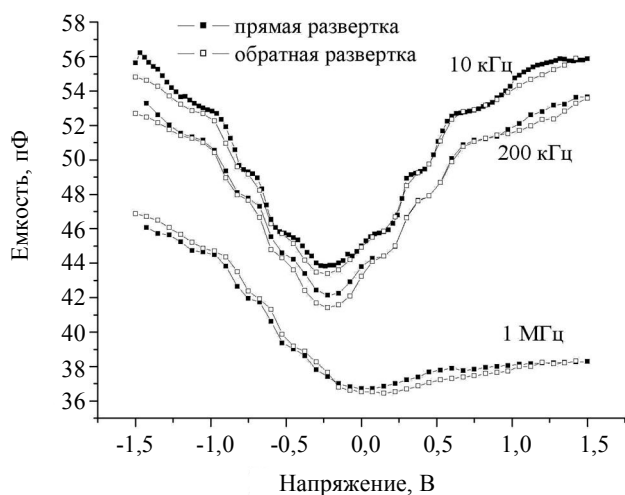


Рис. 2. ВФХ МДП-структуры № 2 для узкозонного  $p$ -HgCdTe/CdTe

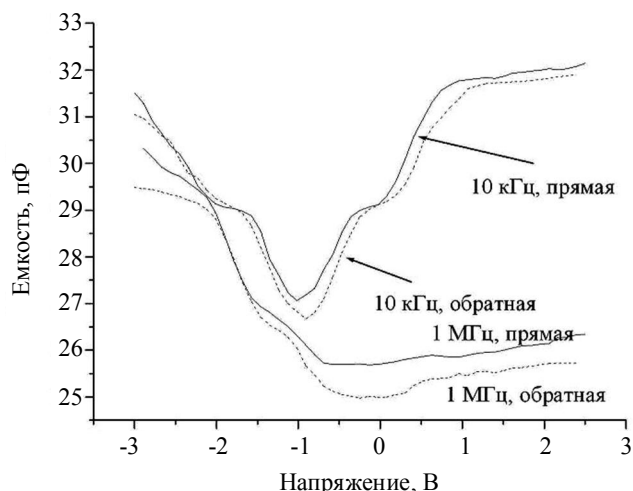


Рис. 3. ВФХ МДП-структуры № 2 с CdTe/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

На рис. 4 и 5 приведены ВФХ для широкозонного образца № 4 с CdTe и для образца № 5 с CdTe/ZnTe, соответственно. Из рис. 4 видно, что высокочастотный вид ВФХ наблюдается уже при частоте тестового сигнала 200 кГц. На частотах 2—50 кГц наблюдается вид, промежуточный между низкочастотным и высокочастотным. Гистерезис практически отсутствует, что свидетельствует о малости подвижного заряда в диэлектрике.

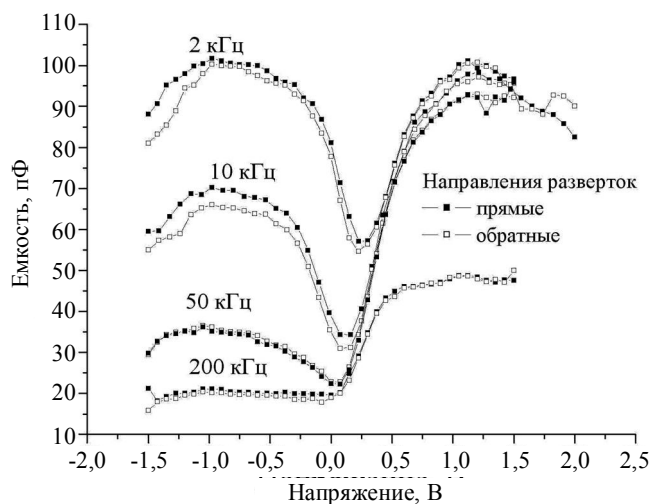


Рис. 4. ВФХ МДП-структуры № 4 для широкозонного образца с CdTe

На рис. 5 показаны ВФХ структуры № 5, измеренные при разных частотах тестового сигнала и различных направлениях развертки напряжения. Из рисунка видно, что высокочастотный вид ВФХ наблюдается при частотах, больших 5 кГц. Уменьшение емкости в обогащении связано с влиянием на измеряемую емкость сопротивления объема эпитаксиальной пленки [4].

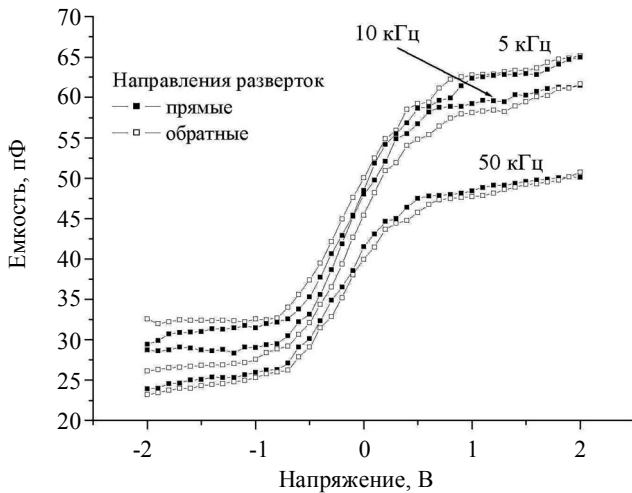


Рис. 5. ВФХ МДП-структуры № 5 для образца с CdTe/ZnTe

### Свойства границы раздела HgCdTe—диэлектрик

Основной задачей исследований являлось определение свойств границы раздела КРТ—защитный диэлектрик. Важнейшим параметром, характеризующим свойства границы раздела, является плотность поверхностных состояний. Для определения плотности поверхностных состояний в МДП-структурах традиционно используют измерение емкости [5, 6] или проводимости. Поскольку измеряемые зависимости дифференциального сопротивления от напряжения не имели характерных минимумов, связанных с поверхностными состояниями, целесообразно использовать для исследования свойств границы раздела КРТ—защитный диэлектрик емкостные методы. Из экспериментальных ВФХ можно определить плотность поверхностных состояний различными методами в зависимости от частоты тестового сигнала.

Структуры с  $x = 0,22—0,23$  (№ 1—3) не имели высокочастотного вида ВФХ в диапазоне частот до 2 МГц, что не позволяло использовать методику Термана для расчета спектров поверхностных состояний. Поскольку применить метод проводимости для оценки плотности поверхностных состояний не представляется возможным из-за влияния на измеряемые величины сопротивления объема, то были проведены оценки плотности поверхностных состояний на основании данных низкочастотных ВФХ.

Оценим возможность получения низкочастотной ВФХ для исследуемых образцов при частоте тестового сигнала 10 кГц. Время отклика поверхностных состояний, расположенных вблизи уровня Ферми в собственном полупроводнике, на переменное тестовое напряжение составляет [7]:

$$\tau_{SS} = (n_i \gamma_n)^{-1},$$

где  $n_i$  — собственная концентрация носителей заряда;

$\gamma_n$  — коэффициент захвата электронов на поверхностные состояния, расположенные вблизи уровня Ферми в собственном полупроводнике.

Рассматривается МДП-структура с полупроводником  $n$ -типа проводимости. При  $\gamma_n = 5 \cdot 10^{-9} \text{ см}^{-3}/\text{с}$  [7] для  $x = 0,22—0,23$  и  $0,32—0,34$  получаем времена перезарядки 2—55 мкс (что соответствует частотам 17—500 кГц) и 1,6—176 с ( $0,0056—0,59$  Гц), соответственно. Таким образом, для партии образцов № 1—3 можно рассматривать ВФХ, измеренные на частотах до 10 кГц как низкочастотные с точки зрения перезарядки поверхностных состояний, расположенных вблизи уровня Ферми в собственном полупроводнике, а для образцов серий № 4—6 необходимо применять только высокочастотные методы.

Для корректного определения величин фиксированного и подвижного зарядов для МДП-структур на основе варизонного HgCdTe необходимо исключение влияния сопротивления объема эпитаксиальной пленки (на высоких частотах), учет эффектов непараболичности и вырождения, а также построение идеальной ВФХ с учетом приповерхностных варизонных слоев. Таким образом, для структур № 1—3 целесообразно использовать низкочастотный экспресс-метод расчета плотности поверхностных состояний вблизи середины запрещенной зоны [6] при построении идеальной ВФХ с учетом наличия приповерхностных варизонных слоев, эффектов вырождения и непараболичности. Для структур № 4—6 целесообразно использовать высокочастотный метод Термана [6].

Результаты исследования свойств границы раздела HgCdTe—диэлектрик приведены в табл. 2. В этой таблице № 1—3 означают МДП-структуры с диэлектриком CdTe, а № 1\*—3\* означают МДП-структуры с защитным покрытием CdTe/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, сформированным на той же гетероструктуре.

Таблица 2

### Свойства границы раздела HgCdTe—диэлектрик

Номер структуры	Плотность фиксированного заряда, Кл/м <sup>2</sup>	Плотность подвижного заряда, Кл/м <sup>2</sup>	Плотность поверхностных состояний, эВ <sup>-1</sup> ·см <sup>-2</sup>
1	$4,4 \cdot 10^{-5}$	$2,67 \cdot 10^{-5}$	$1,01 \cdot 10^{11}$
1*	$1,06 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{11}$
2	$1,83 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{11}$
2*	$2,26 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-6}$	$4,2 \cdot 10^{11}$
3	$8,3 \cdot 10^{-5}$	$8,6 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{11}$
3*	$1,26 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$3,7 \cdot 10^{11}$
4	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$5,6 \cdot 10^{10}$
5	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{11}$
6	$8,6 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$3,1 \cdot 10^{11}$

### Заклучение

Таким образом, исследованы ВФХ МДП-структур с составом в рабочем слое 0,22—0,23 при использовании в качестве защитного диэлектрика только CdTe, а также МДП-структур с двухслойным низкотемпературным диэлектриком CdTe/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, причем последний диэлектрик формировался сверху CdTe низкотемпературным плазмохимическим методом. Исследованы ВФХ МДП-структур с составом в рабочем слое 0,32—0,34 при использовании в качестве защитного диэлектрика только CdTe, а также МДП-структур со слоем ZnTe, сформированным сверху CdTe, при толщине слоя CdTe 0,2 мкм.

Практически все структуры имели малый подвижный заряд, не превышающий 10<sup>-5</sup>—10<sup>-6</sup> Кл/м<sup>2</sup> (за исключением структуры № 1 с двухслойным диэлектриком SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>). Для МДП-структур с  $x = 0,22—0,23$ , использующих в качестве защитного покрытия только CdTe, фиксированный заряд был положительным и изменялся от 4,4·10<sup>-5</sup> до 1,83·10<sup>-4</sup> Кл/м<sup>2</sup>, в то время как для структур с двухслойным диэлектриком SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, сформированным сверху CdTe, фиксированный заряд также был положительным и изменялся от 1,06·10<sup>-4</sup> до 2,26·10<sup>-4</sup> Кл/м<sup>2</sup>, т. е. нанесение диэлектрика SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> приводит к некоторому увеличению фиксированного заряда. Для МДП-структур с  $x = 0,32—0,34$  с CdTe в качестве защитного покрытия фиксированный заряд составлял 1,9·10<sup>-4</sup> Кл/м<sup>2</sup>, а для образцов с толстым слоем CdTe и нанесенным сверху ZnTe фиксированный заряд изменялся от 1,9·10<sup>-5</sup> до 8,6·10<sup>-5</sup> Кл/м<sup>2</sup>, т. е. нанесение ZnTe не приводит к увеличению величины фиксированного заряда.

Формирование сверху CdTe защитного покрытия SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> для МДП-структур с  $x = 0,22—0,23$  приводит к некоторому увеличению плотности поверхностных состояний вблизи уровня Ферми для собственного полупроводника (от (1,01—2,8)·10<sup>11</sup> до (2—4,2)·10<sup>11</sup> эВ<sup>-1</sup>·см<sup>-2</sup>). Для МДП-структур с  $x = 0,32—0,34$  нанесение ZnTe сверху CdTe также приводит к некоторому увеличению плотности поверхностных состояний вблизи середины запрещенной зоны от (1—10)·10<sup>10</sup> до (1—3)·10<sup>11</sup> эВ<sup>-1</sup>·см<sup>-2</sup>. Вблизи края зоны проводимости плотность поверхностных состояний для МДП-структур с  $x = 0,32—0,36$  возрастает до 10<sup>12</sup> эВ<sup>-1</sup>·см<sup>-2</sup> независимо от использованного защитного покрытия.

Таким образом, можно считать перспективными для пассивации матриц фотодиодов защитные покрытия CdTe и CdTe/ZnTe, сформированные в одном технологическом процессе при выращивании гетероэпитаксиальных структур.

### Литература

1. *Рогальский А.* Инфракрасные детекторы: Пер. с англ./ Под ред. А. В. Войцеховского. — Новосибирск: Наука, 2003.
2. *Овсюк В. Н., Курьшев Г. Л., Сидоров Ю. Г. и др.* Матричные фотоприемники инфракрасного диапазона. — Новосибирск: Наука, 2001.
3. *Войцеховский А. В., Давыдов В. Н.* Фотоэлектрические МДП-структуры из узкозонных полупроводников. — Томск: Радио и связь, 1990.
4. *Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Дзядух С. М.* // Известия вузов. Физика. 2005. № 6. С. 31.
5. *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов. — М.: Энергия, 1973.
6. *Колешико В. М., Каплан Г. Д.* // Обзоры по электронной технике. 1977. № 2 (465).
7. *Kinch M. A.* // Semiconductors and Semimetals. 1981. V. 18. P. 313.

## Investigation of electrophysical properties of MIS structures on basis of the MBE HgCdTe HES

*A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh*  
ASD "SPTI TSU", 1 Novosobornaya sq., Tomsk, 634050, Russia  
E-mail: vav@elefot.tsu.ru

*V. V. Vasilev, V. S. Varavin, S. A. Dvoretzky, N. N. Mikhailov, Yu. G. Sidorov, Yu. P. Mashukov, M. V. Yakushev*  
IPS SB RAS, 13 Ac. Lavrent'ev av., Novosibirsk, 630090, Russia  
E-mail: dvor@isp.nsc.ru

*The experimental investigation of electrophysical characteristics of MIS structures on basis of HgCdTe/CdTe, HgCdTe/CdTe/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> and HgCdTe/CdTe/ZnTe were carry out. For all structures the density of fixed and moved chares and also density of surface stated are determined. It is shown that best properties of boundary observed for HgCdTe/CdTe, formed at grown heteroepitaxial structures.*

PACS: 73.40.Qv; 72.80. Sk; 73.20.-r; 73.21.Ac

*Keywords:* MIS-structure, mercury cadmium telluride, electrophysical characteristics.

*Bibliography* — 7 references.

*Received January 12, 2010*