

Д. ф.-м. н. А. В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ, к. ф.-м. н. С. Н. НЕСМЕЛОВ,  
д. т. н. Н. А. КУЛЬЧИЦКИЙ

Россия, г. Томск, Сибирский физико-технический институт;  
г. Москва, МГИРЭА  
E-mail: vav@elefot.tsu.ru

Дата поступления в редакцию  
26.01 2005 г.

Оппонент д. т. н. Р. В. КОНАКОВА  
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

## ЕМКОСТНЫЕ СВОЙСТВА МДП-СТРУКТУР HgCdTe/ SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

*Экспериментальные исследования показали, что использование двухслойного диэлектрика SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> перспективно для пассивации поверхности матричных HgCdTe-фотодиодов для инфракрасного диапазона.*

Узкозонный твердый раствор Hg<sub>x</sub>Cd<sub>1-x</sub>Te широко применяется для создания высокочувствительных инфракрасных детекторов, действующих в спектральных диапазонах окон прозрачности атмосферы 3—5 и 8—12 мкм [1, 2]. При изготовлении матрицы фотодиодов одной из главных проблем является пассивация поверхности HgCdTe, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ HgCdTe), с высокими параметрами границы раздела "полупроводник—диэлектрик" [2]. Диэлектрическое покрытие, используемое для пассивации, должно удовлетворять ряду достаточно жестких условий: низкая температура синтеза (не более 100°C), низкая поверхностная плотность встроенного заряда, хорошие адгезионные свойства, стабильность во времени и при термообработках.

В качестве основного диэлектрического покрытия, удовлетворяющего данным требованиям, применяется низкотемпературный диоксид кремния (температура синтеза 100°C). Однако низкотемпературный SiO<sub>2</sub> активно взаимодействует с атмосферной влагой, в результате чего в объеме пленки накапливается положительный заряд до величины 10<sup>12</sup> см<sup>-2</sup> в течение нескольких недель. Для устранения влияния атмосферной влаги предложено использовать второй диэлектрик—плазмохимический нитрид кремния (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>), который наносится на предварительно осажденный слой SiO<sub>2</sub>.

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований вольт-фарадных характеристик (ВФХ) МДП-структур на основе МЛЭ HgCdTe.

### Образцы и методика экспериментов

Пленки гетероэпитаксиального HgCdTe выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs. При выращивании эпитаксиальных пленок HgCdTe вблизи поверхности создавались варизонные слои толщиной 0,5 мкм с экспоненциаль-

ным повышением компонентного состава CdTe ( $x_{CdTe}$ ) от 0,219—0,231 (в объеме) до 0,45 (у поверхности). Для части образцов (серии 2, 4, см. таблицу) этот приповерхностный широкозонный слой удалялся путем травления в растворе Br<sub>2</sub>-HBr, а для других образцов диэлектрики наносились поверх варизонного слоя (серии 1, 3, 5, 6).

### Исходные параметры МДП-структур

Номер серии	Тип МДП-структуры	$x_{CdTe}$	Наличие варизонного слоя	$n(p)$ , см <sup>-3</sup>	$\mu$ , см <sup>2</sup> /В·с
1	<i>p</i> -HgCdTe/SiO <sub>2</sub> /Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	0,227	Есть	7·10 <sup>15</sup>	400
2	<i>p</i> -HgCdTe/SiO <sub>2</sub> /Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	0,227	Нет	7·10 <sup>15</sup>	400
3	<i>n</i> -HgCdTe/SiO <sub>2</sub> /Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	0,231	Есть	3,5·10 <sup>14</sup>	69000
4	<i>n</i> -HgCdTe/SiO <sub>2</sub> /Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	0,231	Нет	3,5·10 <sup>14</sup>	69000
5	<i>p</i> -HgCdTe/АОП	0,219	Есть	7,2·10 <sup>15</sup>	490
6	<i>n</i> -HgCdTe/АОП	0,222	Есть	1,8·10 <sup>14</sup>	78000

Исследовались МДП-структуры с анодно-окисной пленкой (АОП) в качестве диэлектрика, а также с двухслойным диэлектриком (SiO<sub>2</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) при различных параметрах эпитаксиальной пленки HgCdTe. Толщина SiO<sub>2</sub> составляла 70 нм, толщина Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> — 30 нм. На поверхности диэлектрика формировалась матрица полевых электродов (элементов матрицы) путем напыления индия через специальные маски.

Некоторые исходные параметры (состав в рабочем слое, концентрации  $n(p)$  и подвижности  $\mu$  основных носителей при 77 К) МДП-структур различных серий приведены в таблице.

ВФХ МДП-структур измерялись на автоматизированной установке [3] в диапазоне частот тестового сигнала 1 кГц—2 МГц при изменении напряжения смещения со скоростью 20 мВ/с из области отрицательных напряжений в область положительных (прямая развертка) и наоборот (обратная развертка). Точность измерения емкости составляла 1%.

Для исключения дефектообразующей операции распайки структур была создана охлаждаемая жидким азотом измерительная камера, позволяющая измерять характеристики структур при использовании управляемого микрометрическими винтами тонкого (60 мкм) вольфрамового зонда. Элемент выбирается визуально при помощи микроскопа, установленного над двойным лейкосапфировым окном. Для исключения влия-

Авторы благодарят сотрудников ИФП СО РАН Ю. Г. Сидорова, В. С. Варавина, Н. Н. Михайлова, В. В. Васильева, Т. И. Захарьяш, Ю. П. Машукова за изготовление экспериментальных образцов.

ния засветки на измерения ВФХ окно после опускания зонда перекрывалось охлаждаемой заслонкой.

Расчет идеальных ВФХ, необходимый для определения параметров МДП-структур, проводился с учетом эффектов вырождения и непараболичности зоны проводимости в HgCdTe по модели, описанной в [4]. Для построения идеальных ВФХ МДП-структур на основе варизонного HgCdTe осуществлялось численное решение уравнения Пуассона для неоднородного полупроводника методом стрельбы.

**Экспериментальные результаты**

1) ВФХ *p*-HgCdTe/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/In.

На рис. 1 приведены ВФХ для МДП-структур 1-й и 2-й серий при разных частотах и направлениях развертки напряжения. Как видно из рисунка, ВФХ МДП-структур имеют низкочастотный вид при частотах тестового сигнала 1 и 5 кГц и вид, промежуточный между высокочастотным и низкочастотным, в диапазоне частот 200—1000 кГц.

Расчет идеальных низкочастотных ВФХ позволил установить, что модель, учитывающая непараболичность зоны проводимости и использующая статистику Ферми–Дирака, хорошо описывает экспериментальные ВФХ. На идеальных ВФХ наблюдается, ана-

логично экспериментальным характеристикам, различие емкостей в обогащении и сильной инверсии. Интересной особенностью ВФХ МДП-структур HgCdTe/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> является наличие гистерезиса ВФХ в области слабой инверсии и отсутствие заметных различий ВФХ при прямой и обратной развертке в обеднении — слабом обогащении. Для МДП-структур на основе HgCdTe с варизонным слоем (1-я серия) глубина провала ВФХ больше, чем для структур на основе HgCdTe без варизонного слоя (2-я серия), что объясняется уменьшением концентрации неосновных носителей при увеличении компонентного состава CdTe вблизи поверхности. Значительное уменьшение емкости в обогащении объясняется влиянием сопротивления объема эпитаксиальной пленки на измеряемую емкость при использовании параллельной схемы замещения.

Следует отметить, что влияние сопротивления объема на измеряемые дифференциальную емкость и проводимость МДП-структур на основе эпитаксиального HgCdTe может проявляться в виде максимумов на ВФХ в области слабого обогащения. Сопротивление объема эпитаксиальной пленки может быть найдено по результатам измерений емкости и дифференциальной проводимости МДП-структуры в обогащении на высоких частотах, что позволяет при помощи метода эквивалентных схем рассчитать ВФХ при исключении влияния сопротивления объема.

Напряжение плоских зон для структур 1-й серии составляет –0,44 В при прямом ходе развертки и –0,38 В при обратном ходе развертки. Выдержка структуры при напряжениях амплитудой 10 В обеих полярностей в течение 10 мин не приводит к заметному изменению напряжения плоских зон. Плотность суммарного эффективного заряда на границе раздела "диэлектрик—полупроводник" (обусловленного суммарным влиянием разности работ выхода из металла и полупроводника, фиксированным и подвижным зарядом в диэлектрике, а также зарядом поверхностных состояний) составляет  $1,58 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup> при прямой и  $1,37 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup> при обратной развертке напряжения.

Для МДП-структур 2-й серии напряжение плоских зон при прямой и обратной развертке составляет –0,72 В, что соответствует плотности эффективного приведенного заряда  $2,5 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup>. Подача положительного напряжения смещения приводит к появлению индуцированного отрицательного заряда величиной около  $0,9 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup>.

2) ВФХ *n*-HgCdTe/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/In.

На рис. 2 приведены ВФХ МДП-структур *n*-HgCdTe/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 3-й и 4-й серий. Как следует из рис. 2, а, для МДП-структур на основе HgCdTe с варизонным слоем (3-я серия) типичен гистерезис в режиме обеднения и отсутствие гистерезиса в инверсии; частотная дисперсия незначительна. Глубина провала ВФХ для МДП-структур с варизонным слоем больше, чем для МДП-структур без варизонного слоя. Для образца без варизонного слоя (4-я серия) наблюдается увеличение глубины провала при увеличении частоты тестового сигнала, что может быть обусловлено влиянием на измеряемую емкость ем-

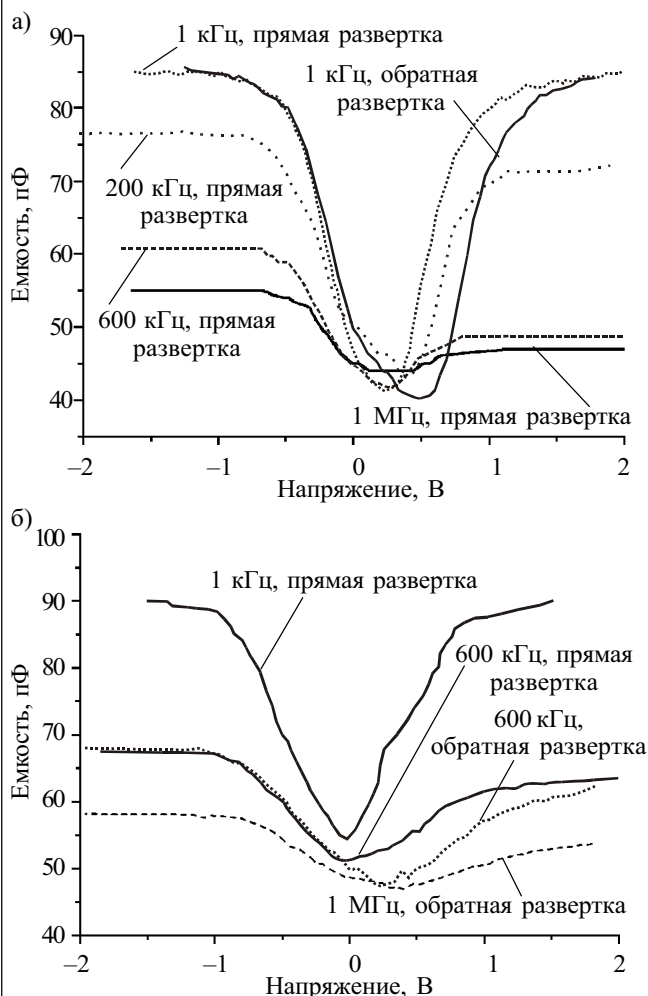


Рис. 1. ВФХ МДП-структур *p*-HgCdTe/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 1-й серии (а) и 2-й серии (б) при разных частотах и направлениях развертки

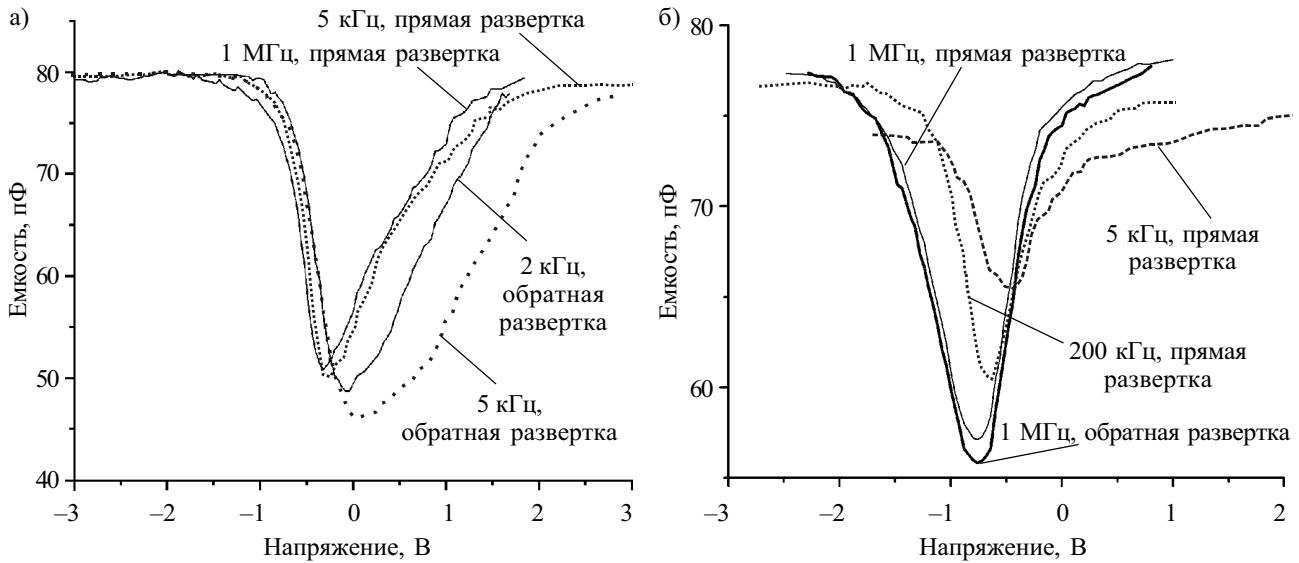


Рис. 2. ВФХ МДП-структур  $n\text{-HgCdTe/SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$  3-й серии (а) и 4-й серии (б) при разных частотах и направлениях развертки

кости поверхностных состояний на низких частотах. Для структур данной серии типичен низкочастотный вид ВФХ при частотах тестового сигнала до 1 МГц. Отсутствие заметной частотной дисперсии емкости в обогащении связано с более высокой проводимостью пленки ( $4 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ ).

Интересной особенностью, наблюдавшейся для большого числа образцов, является большой гистерезис ВФХ МДП-структур  $n\text{-HgCdTe/SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$  с приповерхностными широкозонными слоями (по сравнению с МДП-структурами без варизонных слоев). Также для всех структур с двухслойным диэлектриком ( $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ ) отмечено наличие заметного гистерезиса в области положительных (относительно минимума ВФХ) напряжений, что позволяет предположить, что причиной гистерезиса является инжекция электронов из приповерхностного слоя полупроводника в диэлектрик.

Для структур 3-й серии напряжение плоских зон составляет 0,42 В при прямой развертке напряжения и 1,53 В при обратной развертке, а для структур 4-й серии — 0,48 В. Величина плотности отрицательного эффективного заряда составляет для структур 3-й серии  $1,3 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/м}^2$  и  $4,8 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/м}^2$ , а для МДП-структуры 4-й серии типичен положительный заряд с плотностью  $1,44 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/м}^2$ .

3) ВФХ  $p$ - и  $n\text{-HgCdTe/AOP/In}$ .

С целью сравнения характеристик МДП-структур с различными диэлектриками были проведены исследования ВФХ структур  $\text{HgCdTe/AOP}$  при разных типах проводимости варизонного полупроводника.

На рис. 3 приведены экспериментальные ВФХ для МДП-структур на основе  $\text{HgCdTe}$   $p$ - и  $n$ -типов проводимости. Большие значения емкости диэлектрика для структур с АОП, обусловленные большой диэлектрической проницаемостью, определяют важную роль влияния сопротивления объема пленки на формирование электрических характеристик. Частотная дисперсия емкости в обогащении и сильной инверсии ярко выражена при проводимостях объема  $0,63 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$  (рис. 3, а) и  $2,6 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$  (рис. 3, б).

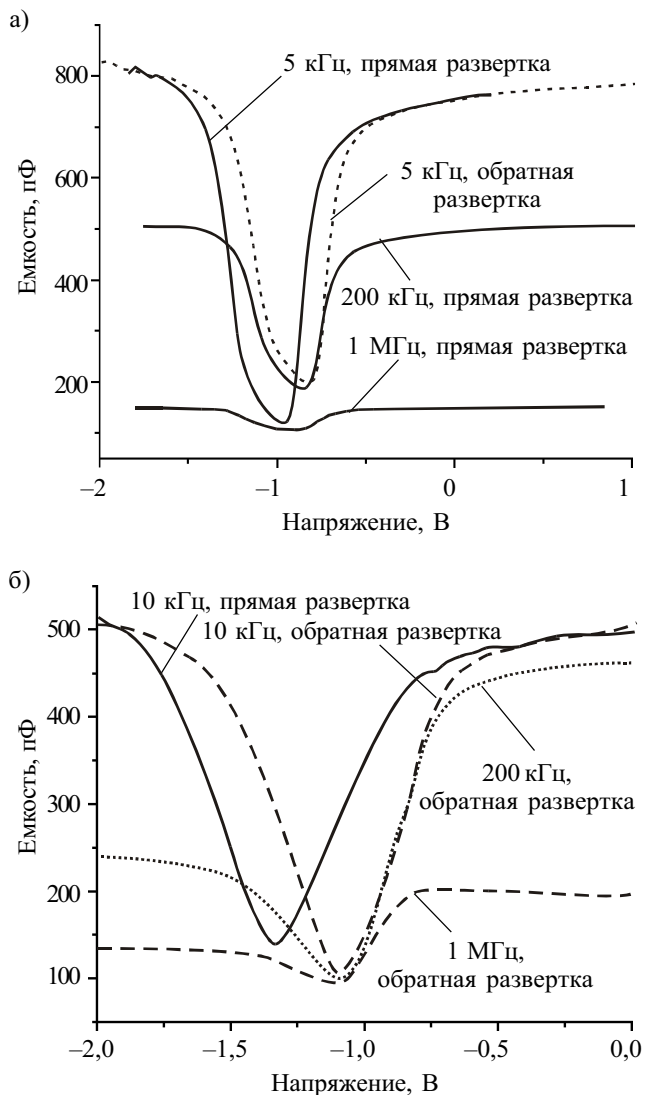


Рис. 3. ВФХ МДП-структур  $p\text{-HgCdTe/AOP/In}$  5-й серии (а) и 6-й серии (б) на разных частотах

Наличие максимума в области слабого обогащения на ВФХ МДП-структур  $n$ -HgCdTe/АОП связано с немонотонной зависимостью измеряемой емкости от емкости области пространственного заряда при значительном сопротивлении объема эпитаксиальной пленки. Напряжение плоских зон на низких частотах для МДП-структур 5-й серии при прямой и обратной развертке составляет соответственно  $-1,25$  и  $-1,1$  В, эффективный приведенный заряд равен  $4 \cdot 10^{-3}$  и  $3,5 \cdot 10^{-3}$  Кл/м<sup>2</sup>, соответственно. Гистерезис проявляется для структур 5-й серии и в инверсии, и в обеднении, величина эффективного подвижного заряда составляет  $5 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup>.

Для МДП-структур 6-й серии при подаче напряжения до  $-2$  В при прямой развертке напряжение плоских зон составляет  $-1,38$  В, при обратной —  $-1,08$  В, что соответствует плотностям заряда  $2,8 \cdot 10^{-3}$  и  $2,2 \cdot 10^{-3}$  Кл/м<sup>2</sup>, соответственно. Плотность подвижного заряда для МДП-структур 6-й серии составляет  $6 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup>.

В исходном состоянии напряжение плоских зон для МДП-структур HgCdTe/АОП составляет около  $-0,5$  В, что соответствует плотности приведенного к границе раздела заряда  $10^{-3}$  Кл/м<sup>2</sup>. После подачи отрицательного напряжения, соответствующего инверсии, характеристики МДП-структур сдвигаются в область отрицательных напряжений, что свидетельствует о накоплении в АОП положительного заряда. Напряжение плоских зон МДП-структур HgCdTe/АОП зависит от того, какой амплитуды отрицательное напряжение прикладывалось к данной структуре. Для МДП-структур  $n$ -HgCdTe/АОП при нулевом смещении реализуется режим обогащения, для МДП-структур  $p$ -HgCdTe/АОП реализуется режим инверсии. В отличие от структур с двухслойным диэлектриком, в данном случае гистерезис ВФХ наблюдается во всей области напряжений, соответствующих модуляции ВФХ.

#### Обсуждение результатов эксперимента

Таким образом, экспериментально исследованы ВФХ МДП-структур  $p(n)$ -HgCdTe/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> и  $p(n)$ -HgCdTe/АОП, в том числе с приповерхностными варизонными слоями. Показано, что сопротивление объема эпитаксиальной пленки существенно влияет на измеряемую емкость МДП-структур  $p$ -HgCdTe/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>,  $n$ -HgCdTe/АОП и  $p$ -HgCdTe/АОП при концентрации основных носителей в пленке  $10^{14}$ — $10^{15}$  см<sup>-3</sup>.

МДП-структуры с анодным оксидом обладают большой емкостью диэлектрика ( $600$ — $700$  пФ), большей модуляцией емкости на низких частотах ( $300$ — $500$  пФ), частотной дисперсией емкости в обогащении. Подача отрицательного напряжения амплитудой в несколько вольт часто приводит к пробую АОП. В исходном состоянии напряжение плоских зон для МДП-структур HgCdTe/АОП составляет около  $-0,5$  В, что соответствует плотности приведенного к границе раздела заряда около  $10^{-3}$  Кл/м<sup>2</sup>. После подачи отрицательного напряжения, соответствующего инверсии, характеристики МДП-структур сдвигаются в область отрицательных напряжений, что свидетельствует о накоплении в АОП положительного заряда (до  $4 \cdot 10^{-3}$  Кл/м<sup>2</sup> при

подаче напряжения от  $-2$  В до  $2$  В). Напряжение плоских зон МДП-структур HgCdTe/АОП зависит от того, какой амплитуды отрицательное напряжение прикладывалось к данной структуре. Для МДП-структур HgCdTe/АОП при нулевом смещении реализуется режим обогащения.

Для МДП-структур с анодным оксидом типичен гистерезис ВФХ при напряжениях, соответствующих режимам обогащения, обеднения, инверсии, и плотность подвижного заряда составляет около  $5 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup> при изменениях напряжения от  $-2$  В до  $2$  В.

МДП-структуры с двухслойным диэлектриком (SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) обладают малой емкостью диэлектрика ( $70$ — $90$  пФ), что связано с меньшей, чем в АОП, диэлектрической проницаемостью SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, гистерезисом в области положительных (относительно напряжения плоских зон) напряжений. Подача напряжений в диапазоне  $-10$  В... $10$  В не приводит к пробую диэлектрика, а также к накоплению фиксированного заряда в диэлектрике. Напряжение плоских зон для МДП-структур на основе HgCdTe с варизонными слоями при прямой развертке напряжения не превышает по модулю  $0,4$  В, что соответствует плотности эффективного заряда около  $1,4 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup>.

Для МДП-структур с двухслойным диэлектриком на основе HgCdTe без варизонных слоев плотность эффективного заряда может достигать  $5 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup>. Плотность подвижного заряда для МДП-структур HgCdTe/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> может достигать  $3,5 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup> для случая наличия варизонных слоев, а для МДП-структур на основе однородного полупроводника электронного типа проводимости плотность подвижного заряда существенно меньше. При нулевом смещении для МДП-структур HgCdTe/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> типична реализация режимов слабого обогащения, обеднения или слабой инверсии в зависимости от типа проводимости полупроводника и наличия варизонных слоев.

#### Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о перспективности использования двухслойного диэлектрика SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> для целей пассивации поверхности матричных фотоприемников на основе HgCdTe из-за высокой электрической прочности, стабильности и возможностей минимизации фиксированного и подвижного зарядов в этом диэлектрическом покрытии.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Рогальский А. Инфракрасные детекторы.— Новосибирск: Наука, 2003.
2. Овсяк В. Н., Курьшев Г. Л., Сидоров Ю. Г. и др. Матричные фотоприемные устройства 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., Кульчицкий Н. А. Емкостные свойства МДП-структур HgCdTe/SiO<sub>2</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>// Мат-лы 10-й Междунар. науч.-техн. конф. «Высокие технологии в промышленности России».— Москва.— 2004.— С. 141—147.