

Фотоэлектроника: элементная база и технология

УДК 621.315

Исследование свойств границ раздела HgCdTe/АОП и HgCdTe/SiO₂—Si₃N₄

А. В. Войцеховский, С. Н. Несмелов, С. М. Дзядуч
СФТИ при ТГУ, г. Томск, Россия

В. С. Варавин, С. А. Дворецкий, Н. Н. Михайлов, Ю. Г. Сидоров, В. В. Васильев,
Т. И. Захарьян, Ю. П. Машуков
ИФП СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Экспериментально исследованы свойства границ раздела HgCdTe с двухслойным диэлектриком SiO₂/Si₃N₄ и с анодным оксидом с помощью МДП-структур, созданных на основе гетероэпитаксиального HgCdTe, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Показано, что двухслойный диэлектрик SiO₂/Si₃N₄ хорошо подходит для пассивации поверхности матричных фотодиодов из-за возможностей управления зарядами в диэлектриках и на границе раздела.

Введение

Узкозонный твердый раствор Hg_xCd_{1-x}Te (КРТ) — основной материал для создания высокочувствительных ИК-фотодиодов для спектрального диапазона 8—12 мкм [1—3]. Использование метода МЛЭ дает возможность создания варизонных пленок HgCdTe, т. е. пленок с заданными профилями 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 Hg_xCd_{1-x}Te необходима пассивация поверхности КРТ диэлектрическими покрытиями. Параметры матричных фотоприемников в значительной степени зависят от качества границы раздела КРТ/диэлектрик.

Важнейшими характеристиками пассивирующего диэлектрика являются плотности фиксированного и подвижного зарядов, а также плотность поверхностных состояний.

Интерес к МДП-структурам на основе варизонного КРТ обусловлен необходимостью пассивации поверхности матриц фотодиодов на основе КРТ. Следует отметить, что традиционные методики, разработанные для исследования свойств границ раздела в МДП-структурах с однородным полупроводником, не подходят для исследования свойств МДП-структур на основе варизонных полупроводников.

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований свойств границ раздела в МДП-структурах HgCdTe/SiO₂/Si₃N₄ и HgCdTe/АОП (анодно-оксидная пленка).

Эти структуры формировались на основе гетероэпитаксиальных варизонных пленок Hg_{1-x}Cd_xTe электронного ($x = 0,21—0,32$) и дырочного ($x = 0,22$) типов проводимости, выращенных на подложках из GaAs методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

Образцы и методики эксперимента

Исследуемые МДП-структуры изготавливали на основе HgCdTe дырочного ($x = 0,22$) и электронного ($x = 0,21—0,32$) типов проводимости, выращенных методом МЛЭ молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках из GaAs(013). При выращивании гетероструктур с обеих сторон рабочего слоя (толщина 7,7—8,3 мкм, состав 0,21—0,32) создавались варизонные слои с повышенным компонентным составом CdTe (толщина приповерхностного варизонного слоя 0,5—0,7 мкм, а у поверхности достигала 0,43—0,48). Для исследованных образцов *n*-HgCdTe при 77 К подвижность основных носителей изменялась в пределах 16 000—78 000 см²·В⁻¹·с⁻¹, время жизни — 0,03—10 мкс, концентрация основных носителей 2·10¹⁴—4,9·10¹⁶ см⁻³. Исходная проводимость для исследованных образцов изменялась от 0,63 до 116 Ом⁻¹·см⁻¹. В табл. 1 приведены основные электрические параметры гетероструктур при 77 К.

Таблица 1

Электрические параметры гетероструктур

Шифр, № п/п	Состав	Концентрация электронов · 10 ¹⁴ (B = 0,05Тл), см ⁻³	Подвижность электронов, (B = 0,05 Тл), см ² ·В ⁻¹ ·с ⁻¹	Проводимость, (B = 0 Тл), Ом ⁻¹ ·см ⁻¹	Время жизни, мкс	Плотность ростовых дефектов, см ⁻²
1	0,23	3,7	70 000	4,5	6,5—7	1500—3000
2	0,22	1,8	78 000	2,6	2—3	1000—3000
3	0,214	2,4	85 000	3,5	5,7	500—1500

Диэлектрические покрытия (анодно-оксидная пленка или низкотемпературный плазмохимический диэлектрик SiO₂/Si₃N₄) для части гетероструктур наносили поверх варизонного слоя, а для других гетероструктур — после удаления приповерхностного варизонного слоя путем травления в HBr—Br₂.

При выращивании анодного оксида (АО) использовали аммиачный источник или КОН-источник. При создании двухслойного диэлектрика SiO₂/Si₃N₄ температура подложки не превышала 100 °С, толщина слоя SiO₂ составляла 70 нм, толщина Si₃N₄ — 30 нм. Тыловой контакт создавался на поверхности эпитаксиальной пленки после локального удаления диэлектрика.

В ходе экспериментальных исследований измерялись зависимости фотоЭДС от напряжения, частоты модуляции светового потока и температуры, а также вольт-фарадные и вольт-сименские характеристики 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.

Учет влияния на измеряемые емкость и проводимость сопротивления объема эпитаксиальной пленки

Исследования показали, что для корректного определения параметров границы раздела МЛЭ HgCdTe / диэлектрик необходим учет влияния на измеряемые емкость и проводимость сопротивления объема рабочей области эпитаксиальной пленки. На рис. 1 приведена эквивалентная схема МДП-структуры в режиме сильной инверсии. В состав схемы входят: емкость диэлектрика C_{ox}, емкость и проводимость C_p и G_p области пространственного заряда полупроводника и сопротивление объема эпитаксиальной пленки R_s.

В эксперименте измеряются емкость и проводимость при параллельной схеме замещения. При типичных значениях сопротивления объема 100—

1000 Ом и достаточно высоких частотах (200—1000 кГц) наблюдается уменьшение измеряемой емкости в режиме обогащения (рис. 2). На рис. 2 приведены частотные значения измеряемой емкости и проводимости при сопротивлении объема 0 и 430 Ом, точками показаны экспериментальные данные для одной из МДП-структур.

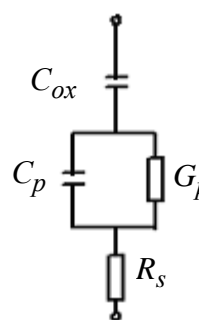


Рис. 1. Эквивалентная схема МДП-структуры: C_{ox} — с разделением элементов, характеризующих диэлектрик; C_p, G_p — область пространственного заряда; R_s — объем полупроводника

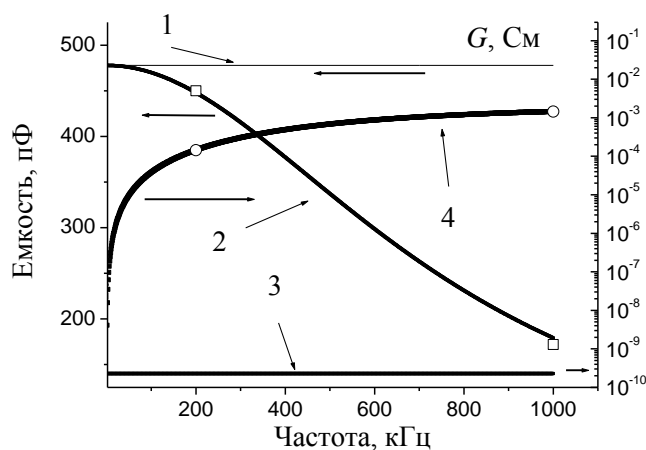


Рис. 2. Расчетные зависимости измеряемых емкости (1, 2) и проводимости (3, 4) от частоты при C_{ox} = 480 пФ, C_p = 10⁵ пФ; G_p = 10⁻⁵ См: кривые 1, 3 — R_s = 0 Ом; 2, 4 — R_s = 430 Ом; ... — результаты измерений для МДП-структуры HgCdTe/АОП с варизонным слоем на частотах 200 кГц и 1 МГц

Влияние сопротивления объема на измеряемую емкость можно исключить путем соответствующей обработки экспериментальных данных [4]. Для этого необходимо по этим данным найти зна-

чения параметров эквивалентной схемы и рассчитать ВФХ при нулевом значении сопротивления объема. На рис. 3, *a* приведены экспериментальные ВФХ МДП-структуры на основе эпитаксиального HgCdTe, а также ВФХ, рассчитанные по экспериментальным данным с исключением влияния сопротивления объема. Из рис. 3, *a* видно, что емкость МДП-структуры в обогащении не зависит от частоты после исключения влияния на измеряемую емкость сопротивления объема эпитаксиальной пленки.

Вольт-фарадные характеристики МДП-структур на основе варизонного HgCdTe

Для определения спектров поверхностных состояний в МДП-структурах на основе КРТ без варизонных слоев с $x = 0,22$ хорошо подходит низкочастотный метод при учете эффектов вырождения и непараболичности в процессе расчета иде-

альной вольт-фарадной характеристики [5]. На рис. 3, *б* показаны ВФХ, рассчитанные для МДП-структуры на основе HgCdTe с $x = 0,23$ без варизонного слоя при различных концентрациях носителей заряда.

Для анализа плотности поверхностных состояний в МДП-структурах на основе варизонного КРТ необходима методика построения идеальных вольт-фарадных характеристик для таких структур. Нами проведен расчет вольт-фарадных характеристик МДП-структур с приповерхностными варизонными слоями путем численного решения уравнения Пуассона для различных законов распределения компонентного состава в приповерхностном слое. На рис. 3, *в* приведены расчетные и экспериментальные ВФХ для МДП-структуры с варизонным слоем и без него. Из данного рисунка следует, что учет варизонного слоя необходим для корректного построения идеальной вольт-фарадной характеристики.

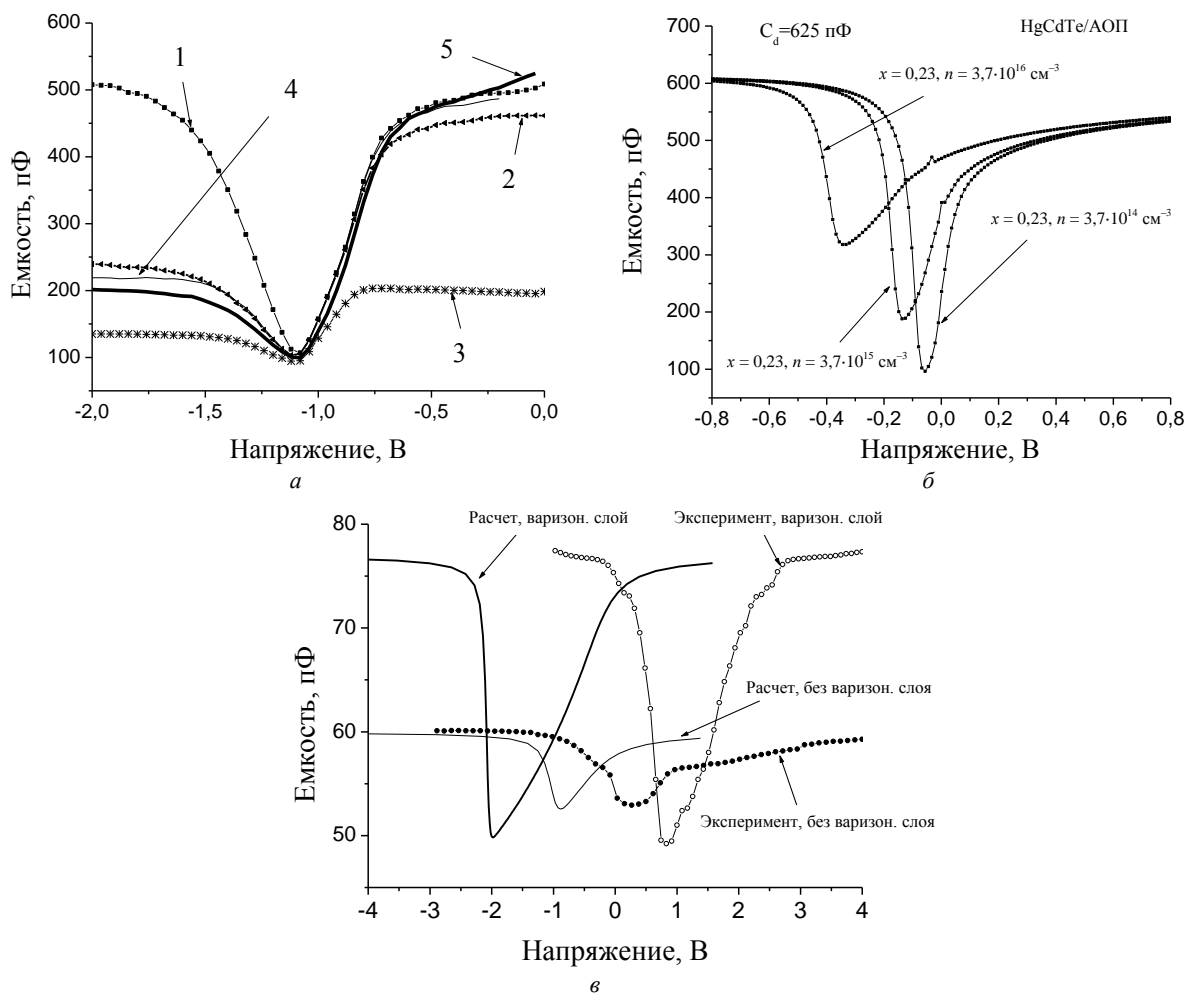


Рис. 3. Вольт-фарадные характеристики:

МДП-структуры HgCdTe/АОП с варизонным слоем при обратной развертке напряжения (*a*): 1 — $f = 10$ кГц; 2, 4 — 200 кГц; 3, 5 — 1 МГц; кривые 4 и 5 — экспериментальные ВФХ — после пересчета с исключением влияния сопротивления объема; идеальные ВФХ МДП-структур HgCdTe/АОП при составе 0,23 и разных концентрациях носителей (*б*); расчетные и экспериментальные ВФХ для МДП-структуры с $x = 0,22$, $n = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, с варизонным слоем и без него (*в*)

Свойства границ раздела HgCdTe/SiO₂/Si₃N₄ и HgCdTe/АОП

Для корректного определения величин фиксированного и подвижного зарядов для МДП-структур на основе варизонного слоя HgCdTe необходимо исключение влияния сопротивления объема (на высоких частотах), учет эффектов непараболичности и вырождения, а также построение идеальной ВФХ с учетом приповерхностных варизонных слоев.

Для МДП-структур на основе HgCdTe без варизонного слоя при определении плотности поверхностных состояний хорошо подходит метод Берглунда при измерениях на частоте до 10 кГц (низкочастотный метод), для МДП-структур с варизонными слоями предпочтительнее использование высокочастотного метода из-за большого времени перезарядки поверхностных состояний в случае наличия приповерхностного варизонного слоя.

Рассчитав идеальные ВФХ МДП-структур, можно путем сравнения экспериментальных и идеальных ВФХ рассчитать некоторые параметры границы раздела и диэлектрика (табл. 2). Плотность поверхностных состояний определялась в минимуме вольт-фарадной характеристики.

Из табл. 2 следует, что плотность поверхностных состояний существенно меньше для МДП-структур с варизонным слоем. Плотность поверхностных состояний (ПС) МДП-структур с варизонными слоями составляет вблизи середины запрещенной зоны $(0,64—1,7) \cdot 10^{11}$ эВ⁻¹·см⁻² для МДП-структур HgCdTe/АОП. Для МДП-структур HgCdTe/SiO₂/Si₃N₄ с варизонными слоями плот-

ность ПС меняется от $1,17 \cdot 10^{11}$ эВ⁻¹·см⁻² для образца № 1 до $3,83 \cdot 10^{11}$ эВ⁻¹·см⁻² — для № 3 (этот образец обладал и большими фиксированным и подвижным зарядами). Для МДП-структур без варизонного слоя минимальная плотность ПС значительно больше и меняется для МДП-структур от $5,45 \cdot 10^{11}$ эВ⁻¹·см⁻² (образцы № 2—4) до $1,5 \cdot 10^{12}$ эВ⁻¹·см⁻² (образцы № 3—2).

По нашим данным, меньшую плотность поверхностных состояний обеспечивает граница раздела КРТ с АО, созданным с использованием КОН-источника (по сравнению с АО из аммиачного источника).

Таким образом, проведено сравнение свойств МДП-структур с различными диэлектриками.

МДП-структуры с анодным оксидом обладают большой емкостью диэлектрика (600—700 пФ), большей модуляцией емкости на низких частотах (300—500 пФ), дифференциальным сопротивлением на 1 МГц в обогащении менее 100 Ом. Подача напряжения (-3÷-4В), соответствующего сильной инверсии, часто приводит к пробоем 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 10^{-3} Кл/м². 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.

Таблица 2

Параметры МДП-структур, определенные из измерений ВФХ

№ образца	Диэлектрик, наличие варизонности	Емкость диэлектрика, пФ	Напряжение плоских зон после подачи -2 В (в скобках исходное), В	Плотность подвижного заряда, Кл/м ²	Плотность фиксированного заряда после подачи -2 В (в скобках исходная), Кл/м ²	N_{ss} , эВ ⁻¹ ·см ⁻²
1—1	АО, аммиак, варизон. слой	540	-1,15 (-0,77)	$5,04 \cdot 10^{-4}$	$2,07 \cdot 10^{-3}$ ($1,38 \cdot 10^{-3}$)	$1,6 \cdot 10^{11}$
1—2	АО, аммиак, без варизон. слоя	625	-1,3 (-1,1)	$2,29 \cdot 10^{-4}$	$2,71 \cdot 10^{-3}$ ($2,2 \cdot 10^{-3}$)	$1,1 \cdot 10^{12}$
1—3	АО, КОН, варизон. слой	546	-1,27 (-0,78)	$6,06 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$ ($1,42 \cdot 10^{-3}$)	$1,17 \cdot 10^{11}$
1—4	АО, КОН, без варизон. слоя	633	-1,64 (-1,26)	$2,11 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$ ($2,66 \cdot 10^{-3}$)	$9,7 \cdot 10^{11}$
1—5	SiO ₂ /Si ₃ N ₄ , варизон. слой	77	0,06 (0,06)	$5,13 \cdot 10^{-5}$	$-1,54 \cdot 10^{-5}$ ($-1,54 \cdot 10^{-5}$)	$1,17 \cdot 10^{11}$
1—6	SiO ₂ /Si ₃ N ₄ , без варизон. слоя	67	0,06 (0,06)	0	$-1,4 \cdot 10^{-5}$ ($-1,4 \cdot 10^{-5}$)	$8 \cdot 10^{11}$
2—1	АО, аммиак, варизон. слой	516	-1,08 (-2,48)	$4,64 \cdot 10^{-4}$, $2,47 \cdot 10^{-3}$	$1,85 \cdot 10^{-3}$, $4,2 \cdot 10^{-3}$	$1,77 \cdot 10^{11}$
2—2	АО, аммиак, без варизон. слоя	621	-1,28	$4,14 \cdot 10^{-5}$	$2,65 \cdot 10^{-3}$	$8,4 \cdot 10^{11}$
2—3	АО, КОН, варизон. слой	481	-1,3	$9,62 \cdot 10^{-4}$	$2,08 \cdot 10^{-3}$	$6,4 \cdot 10^{10}$
2—4	АО, КОН, без варизон. слоя	588	-1,54	$1,57 \cdot 10^{-4}$	$3,02 \cdot 10^{-3}$	$5,45 \cdot 10^{11}$
3—1	SiO ₂ /Si ₃ N ₄ , варизон. слой	90	2,5 (2,5)	До $1,14 \cdot 10^{-3}$	$-7,5 \cdot 10^{-4}$	$3,83 \cdot 10^{11}$
3—2	SiO ₂ /Si ₃ N ₄ , без варизон. слоя	77	-0,4 (-0,4)	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{12}$

Для МДП-структур HgCdTe/АОП при нулевом смещении реализуется режим обогащения; МДП-структуры с двухслойным диэлектриком ($\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$) обладают малой емкостью диэлектрика (70—90 пФ), что связано с меньшей, чем в АОП, диэлектрической проницаемостью ($\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$), малой модуляцией емкости (менее 25 пФ), дифференциальное сопротивление в обогащении на 1 МГц составляет 5—15 кОм. Подача напряжений в диапазоне $-10 \div +10$ В не приводит к пробое диэлектрика и к накоплению фиксированного заряда в диэлектрике. Напряжение плоских зон составляет обычно около 0,4 В, что соответствует плотности приведенного к границе раздела фиксированного заряда $8 \cdot 10^{-4}$ Кл/м². При нулевом смещении для МДП-структур HgCdTe/SiO₂/Si₃N₄ реализуются режимы обеднения — слабой инверсии.

Гистерезис инжекционного типа при прямой и обратной развертках напряжения наблюдался для МДП-структур HgCdTe/АОП и HgCdTe/SiO₂/Si₃N₄. Наличие варизонного слоя приводит к увеличению величины гистерезиса для МДП-структур с различными диэлектриками, для МДП-структур без варизонного слоя гистерезис незначителен для МДП-структур HgCdTe/SiO₂/Si₃N₄, для структур с варизонными слоями однозначный вывод сделать сложно (для МДП-структуры HgCdTe/SiO₂/Si₃N₄ — образцы № 3—1 наблюдался крайне большой подвижный заряд).

Заключение

Определены значения напряжений плоских зон, плотности подвижного и фиксированного зарядов для исследованных МДП-структур. Показано, что для всех структур с АОП типичен положительный фиксированный заряд плотностью $(1,85—4) \cdot 10^{-3}$ Кл/м², для МДП-структур HgCdTe/SiO₂/Si₃N₄ (№ 1) типичен малый отрицательный заряд, плотность которого не превышает $2 \cdot 10^{-5}$ Кл/м², для МДП-структур HgCdTe/SiO₂/Si₃N₄ (№ 3) заряды несколько больше. Для всех образцов подтвердился вывод об увеличении плотности подвижного заряда в случае наличия варизонных слоев. Например, для образцов № 1—3 (с варизонным слоем) плотность подвижного заряда составляет $6,06 \cdot 10^{-4}$ Кл/м², а

для образцов № 1—4 (без варизонного слоя) — $2,11 \cdot 10^{-4}$ Кл/м².

Рассчитаны плотности поверхностных состояний вблизи середины запрещенной зоны, а также спектры поверхностных состояний методом Берглунда. Показано, что плотность поверхностных состояний существенно меньше для МДП-структур с варизонным слоем. Плотность поверхностных состояний МДП-структур с варизонными слоями составляет вблизи середины запрещенной зоны $(0,64—1,7) \cdot 10^{11}$ эВ⁻¹·см² для МДП-структур HgCdTe/АОП; для МДП-структур HgCdTe/SiO₂/Si₃N₄ — меняется от $1,17 \cdot 10^{11}$ (для № 1—5) до $3,83 \cdot 10^{11}$ эВ⁻¹·см² (для № 3—1).

Меньшую плотность поверхностных состояний обеспечивает АО, созданный с использованием КОИ-источника (по сравнению с АО из аммиачного источника).

Для МДП-структур HgCdTe/АОП при нулевом напряжении реализуется режим обогащения, а для МДП-структур HgCdTe/SiO₂/Si₃N₄ возможны различные режимы, в том числе и режим плоских зон. Таким образом, низкотемпературный диэлектрик SiO₂/Si₃N₄ хорошо подходит для пассивации поверхности матриц фотодиодов на основе HgCdTe из-за возможностей технологического управления величинами фиксированного заряда в диэлектрике, а также плотностями поверхностных состояний.

Литература

1. *Рогальский А.* Инфракрасные детекторы: Пер. с англ./ Под ред. А. В. Войцеховского. — Новосибирск: Наука, 2003. — 636 с.
2. *Овсяк В. Н., Курьшев Г. Л., Сидоров Ю. Г. и др.* Матричные фотоприемники инфракрасного диапазона. — Новосибирск: Наука, 2001. — 376 с.
3. *Войцеховский А. В., Давыдов В. Н.* Фотоэлектрические МДП-структуры из узкозонных полупроводников. — Томск: Радио и связь, 1990. — 327 с.
4. *Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Дзядух С. М.* // Известия вузов. Сер. Физика. 2005. № 6. С. 31—37.
5. *Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Кульчицкий Н. А.* // Матер. 10-й междунар. науч.-техн. конф. "Высокие технологии в промышленности России" (материалы и устройства функциональной электроники и микрофотоники); матер. 16-й междунар. симпозиума "Тонкие пленки в электронике". — М.: Изд-во "Техномаш", 2004. С. 141—147.

Статья поступила в редакцию 11 октября 2007 г.

The investigation of properties of interfaces of HgCdTe/AOF and HgCdTe/SiO₂—Si₃N₄

A. V. Voitsekhovskiy, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh

Siberian Physical-Technical Institute, Tomsk, Russia

V. S. Varavin, S. A. Dvoretzky, N. N. Mikhailov, Yu. G. Sidorov, V. V. Vasiliev,

T. I. Zakharyash, Yu. P. Mashukov

Institute of Semiconductor Physics, Novosibirsk, Russia

The properties of boundaries between HgCdTe and double-layer insulator SiO₂/Si₃N₄ and also anodic oxide were experimental investigated used by MIS-structures in base of hetero-epitaxial MCT created by molecular-beam epitaxy. It is shown that double-layer insulator SiO₂/Si₃N₄ is convenient for passivation of surface of matrix photodiodes because of possibilities of control of charges in insulators and at boundary.

УДК 621.315.592

Релаксация электрических свойств эпитаксиальных слоев Cd_xHg_{1-x}Te:As(Sb), конвертированных в *n*-тип ионным травлением

И. И. Ижнин

НИИ материалов «Научно-производственное предприятие "Карат"», г. Львов, Украина

В. В. Богобояцкий

Кременчугский государственный политехнический университет, г. Кременчуг, Украина

А. П. Власов

Львовский национальный университет им. И. Франко, г. Львов, Украина

К. Д. Мынбаев

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, С.-Петербург, Россия

М. Поцяк

Институт физики, Жешувский университет, г. Жешув, Польша

*Исследована релаксация электрических свойств легированных As и Sb эпитаксиальных слоев HgCdTe, подвергнутых ионному травлению (ИТ). Показано, что образованные при ИТ донорные комплексы, ответственные за конверсию типа проводимости материала из исходного *p*-типа в *n*-тип, являются нестабильными. Установлено, что процессом, ответственным за релаксацию, является распад донорных комплексов, начинающийся после окончания процесса ИТ и вызванный уменьшением концентрации атомов междоузельной ртути, образующихся при ИТ.*

Введение

Ионное травление узкощелевых твердых растворов *p*-Hg_{1-x}Cd_xTe (КРТ) используется в технологии ИК-фотоприемников на основе этого материала как метод формирования *p-n*-переходов [1, 2]. Метод основан на эффекте образования толстого (толщиной до нескольких сотен микрометров, в зависимости от режима ИТ и параметров материала) слоя *n*-типа проводимости в результате ИТ КРТ *p*-типа. Впервые этот эффект наблюдался в вакансионно-легированном КРТ [3], однако в последнее время — и в материале, легированном акцепторами I и V групп периодической системы (Cu, Au, As, Sb) [4—7].

Особый интерес представляет изучение конверсии в КРТ, легированном мышьяком, поскольку As является на сегодняшний день самой распространенной акцепторной примесью в КРТ благодаря низкому коэффициенту диффузии [8]. О вызванной ИТ конверсии типа проводимости в HgCdTe:As впервые сообщалось в работе [4]; подробно этот эффект изучался в работах [9—13]. Сегодня считается общепринятым, что эта конверсия происходит из-за образования донорных комплексов, состоящих из атомов мышьяка в подрешетке халькогена As_{Te}, и междоузельных атомов ртути Hg_i, образующихся при ИТ [9—11, 14, 15]. Уже имеются сообщения о формировании ИТ *p-n*-пере-