

УДК 621.315.592

Влияние параметров приповерхностных варизонных слоев на емкостные характеристики МДП-структур на основе гетероэпитаксиального HgCdTe МЛЭ

А.В. Войцеховский, С.Н. Несмелов, С.М. Дзядух

Экспериментально исследовано влияние параметров варизонных слоев с повышенным составом CdTe на емкостные характеристики МДП-структур на основе HgCdTe, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Изучены характеристики МДП-структур на основе $n(p)$ -HgCdTe ($x=0,22-0,23$) с различной толщиной приповерхностных варизонных слоев и при различных составах на поверхности. Показано, что увеличение состава на поверхности и толщины варизонных слоев приводит к увеличению дифференциального сопротивления области пространственного заряда.

PACS: 73.40Qv, 73.21As, 85.60Gz, 73.61Ga.

Ключевые слова: МДП-структура, теллурид кадмия ртути, молекулярно-лучевая эпитаксия, приповерхностный варизонный слой.

Введение

Молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) является наиболее перспективным методом изготовления структур на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ (КРТ) [1]. Этот метод позволяет при массовом производстве на подложках их Si и GaAs снизить стоимость КРТ, а также обладает дополнительными возможностями совершенствования характеристик инфракрасных детекторов при выращивании гетероэпитаксиальных структур с заданным распределением состава по толщине пленки.

Приповерхностные варизонные слои с повышенным составом CdTe уменьшают влияние поверхностной рекомбинации на время жизни неосновных носителей заряда в объеме эпитаксиальной пленки, а также позволяют улучшить пороговые характеристики фотодиодов на основе КРТ, если $n-p$ -переход помещать в варизонную область [2]. Исследования электрофизических и фотоэлектрических характеристик МДП-структур на основе варизонного МЛЭ КРТ необходимы для оценки качества пассивирующих покрытий [3, 4], а также для разработки технологии создания матриц монолитных инфракрасных детекторов [5–7].

Войцеховский Александр Васильевич, зав. отделением.
Несмелов Сергей Николаевич, старший научный сотрудник.

Дзядух Станислав Михайлович, старший научный сотрудник.

Сибирский физико-технический институт
Томского государственного университета.

Россия, 634050, Томск, пл. Новособорная, 1.

Тел.: (3822) 41–27–72. E-mail: vav@elefot.tsu.ru

Статья поступила в редакцию 20 января 2013 г.

© Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Дзядух С.М., 2013

К настоящему времени проведен теоретический анализ влияния приповерхностных варизонных слоев (с линейным профилем состава) на вольт-фарадные характеристики МДП-структур на основе абстрактного полупроводника [8]. В экспериментальных работах сравнивались характеристики МДП-структур на основе КРТ с варизонными слоями и без варизонных слоев [9–14] или рассматривались только характеристики структур на основе КРТ МЛЭ с варизонными слоями [15, 16].

В настоящее время известно, что при анализе емкостных характеристик МДП-структур на основе КРТ МЛЭ необходимо учитывать сопротивление объема эпитаксиальной пленки [17]. Создание типичных варизонных слоев (толщиной 0,2–0,5 мкм, состав на поверхности 0,42–0,48) приводит к увеличению глубины провала на низкочастотной вольт-фарадной характеристике МДП-структур на основе $n(p)$ - $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x=0,21-0,23$), а также к увеличению подвижного заряда в диэлектрических покрытиях анодно-оксидная пленка и $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ [9, 10]. Также ранее показано, что зависимость фотоЭДС от напряжения смещения для МДП-структур на основе n - $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x=0,21-0,23$) при создании типичного варизонного слоя принимают «классический» вид, без спада фотоЭДС в сильной инверсии [11, 12]. Это можно объяснить подавлением туннелирования через глубокие уровни при создании варизонного слоя [12]. Однако в настоящее время характеристики МДП-структур на основе гетероэпитаксиального МЛЭ КРТ с различными параметрами варизонных слоев до сих пор практически не исследованы.

Целью данной работы является исследование влияния параметров приповерхностных варизонных слоев на емкостные характеристики МДП-структур на основе гетероэпитаксиального n (p)- $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,22-0,23$), выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

Образцы и методики эксперимента

Исследуемые МДП-структуры изготавливались на основе HgCdTe , выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках из GaAs (013). При выращивании типичных гетероструктур с обеих сторон рабочего слоя (толщина 7,7–8,3 мкм, состав 0,22–0,23) создавались варизонные слои с повышенным компонентным составом CdTe , причем состав у поверхности обычно достигал 0,43–0,48, а толщина верхнего варизонного слоя 0,5–0,7 мкм.

До нанесения диэлектрического покрытия (двухслойного низкотемпературного диэлектрика $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$) при помощи метода Холла были определены концентрации основных носителей (n (p)), подвижности основных носителей (μ_n (μ_p)) и проводимости σ . В табл. 1 приведены геометрические параметры, а в табл. 2 — электрические параметры изготовленных гетероструктур.

Исследованы МДП-структуры на основе n - $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,22-0,23$, образцы 1–3)

и p - $\text{Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ (образцы 4–8). Исследовались структуры без варизонного слоя (образцы 1, 4) и с различными параметрами варизонных слоев (образцы 2, 3, 5–8). При этом состав на поверхности изменялся для образцов n -типа от 0,23 до 0,70, а для образцов p -типа от 0,22 до 0,58. Толщина верхних варизонных слоев изменялась для образцов p -типа от 0,6 до 1,8 мкм, а для образцов n -типа от 0,5 до 0,8 мкм. Образцы 2 и 5 можно отнести к гетероструктурам с типичным варизонным слоем. На рис. 1 и 2 приведены распределения состава по толщине эпитаксиальной пленки, измеренные в приповерхностном слое КРТ автоматическим эллипсометром в процессе роста, для структур 2, 3 и 6–8, соответственно.

Для исключения дефектообразующей операции распайки структур использовалась измерительная камера, позволяющая измерять при температурах 77–300 К характеристики структур при использовании управляемого микрометрическими винтами тонкого (диаметром 60 мкм) вольфрамового зонда. Измерялись вольт-фарадные характеристики МДП-структур на разных частотах. За прямое направление развертки принималось изменение напряжения от отрицательных значений к положительным, а за обратное направление — от положительных к отрицательным. Скорость

Таблица 1

Геометрические параметры гетероструктур

Шифр	Толщина буферного слоя, мкм		Толщина нижнего варизонного слоя КРТ, мкм	Толщина рабочего слоя КРТ, мкм	Толщина верхнего варизонного слоя КРТ, мкм	Состав на поверхности
	ZnTe	CdTe				
1	0,1	6,2	1,3	8,3	нет	0,23
2	0,1	6,3	2,6	7,7	0,5	0,45
3	0,1	6,3	1,7	8,5	0,8	0,7
4	0,1	6,2	1,0	8,2	нет	0,22
5	0,05	6,4	2,8	7,5	0,6	0,44
6	0,05	6,3	1,6	6,9	1,6	0,34
7	0,05	6,3	1,5	7,6	1,8	0,49
8	0,05	6,3	1,3	7,8	1,6	0,58

Таблица 2

Электрические параметры гетероструктур

Шифр	Состав	Тип проводимости	n (p), см^{-3}	μ_n (μ_p), $\text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$	σ , $\text{Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$
1	0,230	n	$3,7 \times 10^{14}$	$7,0 \times 10^4$	4,5
2	0,223	n	$3,1 \times 10^{14}$	$8,2 \times 10^4$	4,2
3	0,220	n	$3,9 \times 10^{14}$	$8,6 \times 10^4$	5,4
4	0,224	p	$8,4 \times 10^{15}$	455	0,63
5	0,224	p	$8,6 \times 10^{15}$	554	0,78
6	0,225	p	$7,1 \times 10^{15}$	537	0,62
7	0,222	p	$7,9 \times 10^{15}$	512	0,65
8	0,225	p	$3,4 \times 10^{15}$	506	0,28

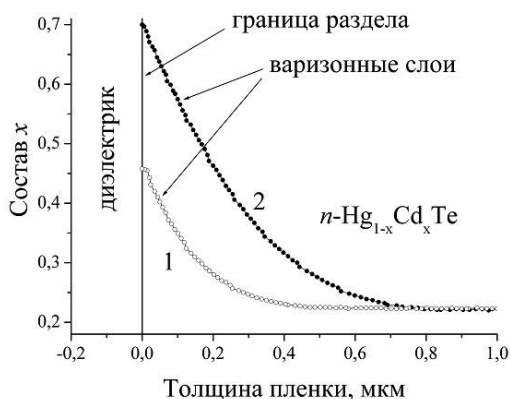


Рис. 1. Распределения состава в приповерхностном слое для МДП-структур на основе $n\text{-HgCdTe}$ с разными составами на поверхности (кривая 1 — образец 2, 2 — образец 3)

изменения напряжения смещения при измерениях не превышала 0,015 В/с.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 3 приведены вольт-фарадные характеристики МДП-структур на основе $n\text{-HgCdTe}$, измеренные на частоте 10 кГц. Из рисунка видно, что модуляция емкости составляет для образца 1 без варизонного слоя только около 7 пФ. Гистерезис для этого образца практически отсутствует, что свидетельствует о низком значении плотности подвижного заряда в диэлектрике. Модуляция емкости для образца 2 составляет около 13 пФ при прямой развертке напряжения и около 18 пФ при обратной развертке напряжения. Гистерезис вольт-фарадных характеристик ярко выражен в режимах обогащения—обеднения, но мал в режиме инверсии. Для образца 3 (состав на поверхности 0,70) модуляция емкости достигает 30 пФ, гистерезис характеристик велик в области обогащения—обеднения, причем вид вольт-

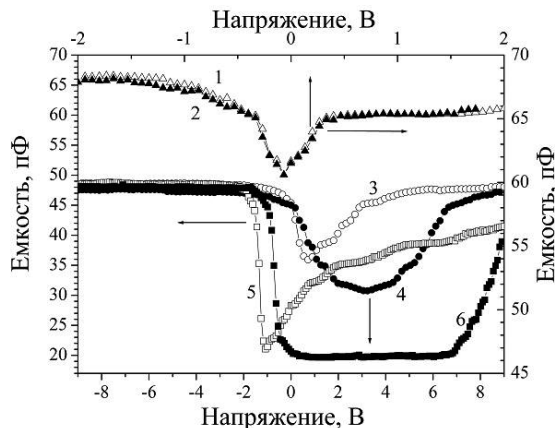


Рис. 3. Вольт-фарадные характеристики МДП-структур на основе $n\text{-HgCdTe}$ (кривые 1, 2 — образец 1; 3, 4 — образец 2; 5, 6 — образец 3) при прямой (1, 3, 5) и обратной (2, 4, 6) развертке напряжения

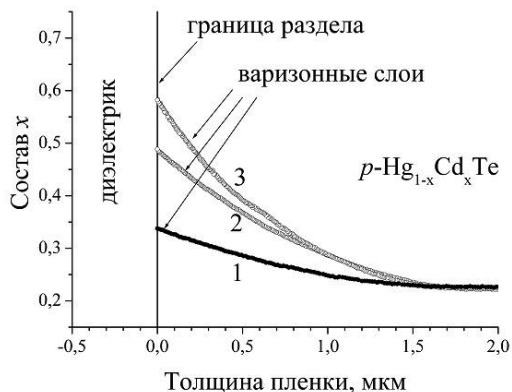


Рис. 2. Распределения состава в приповерхностном слое для МДП-структур на основе $p\text{-HgCdTe}$ с разными составами на поверхности (кривая 1 — образец 6, 2 — образец 7, 3 — образец 8)

фарадной характеристики при обратной развертке напряжения зависит от начального положительного напряжения. Для МДП-структур на основе $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,22\text{--}0,23$) с варизонными слоями вообще типичен наблюдаемый вид гистерезиса вольт-фарадных характеристик: большое различие вида емкостных характеристик в режимах обогащения—обеднения и малое различие в режиме инверсии. Такой вид гистерезиса может быть связан с обратимой инжекцией электронов на состояния вблизи границы раздела при положительных смещениях. Увеличение глубины провала низкочастотной вольт-фарадной характеристики при больших значениях состава CdTe на поверхности связано с изменением условий генерации неосновных носителей вблизи границы раздела из-за уменьшения собственной концентрации. Следует отметить, что при возрастании состава на поверхности вольт-фарадные характеристики не принимают высокочастотного вида. Для образца 3 наблюдается промежуточный между высокочастотным и низкочастотным вид вольт-фарадной характеристики.

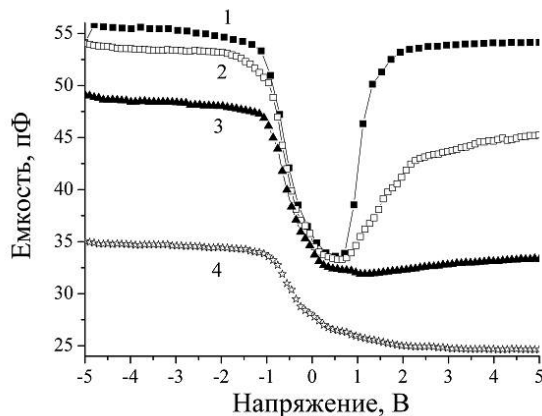


Рис. 4. Вольт-фарадные характеристики МДП-структуры на основе $p\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ (образец 5), измеренные на различных частотах (кривая 1—10 кГц; 2—200 кГц; 3—500 кГц; 4—1 МГц) при прямом направлении развертки напряжения

На рис. 4 приведены вольт-фарадные характеристики МДП-структуры на основе $p\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ (образец 5) с варизонным слоем (состав на поверхности 0,44, толщина варизонного слоя 0,6 мкм), измеренные при прямой развертке напряжения на различных частотах. Из рисунка видно, что на 10 кГц наблюдается низкочастотный вид вольт-фарадной характеристики, а вид, близкий к высокочастотному, наблюдается при частотах тестового сигнала, превышающих 500 кГц. Снижение емкости в обогащении при повышении частоты связано с влиянием на измеряемую емкость сопротивления объема эпитаксиальной пленки [17]. Следует отметить, что высокочастотный вид вольт-фарадной характеристики может наблюдаться на частоте 1 МГц для МДП-структур на основе $p\text{-Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ без варизонного слоя. Для МДП-структур на основе $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,22\text{--}0,23$) на частоте 1 МГц наблюдается промежуточный вид вольт-фарадной характеристики независимо от наличия приповерхностного варизонного слоя с типичными параметрами.

На рис. 5 приведены вольт-фарадные характеристики МДП-структур на основе $n\text{-HgCdTe}$, измеренные на частоте 10 кГц. Из рис. 5 видно, что для образца 4 без варизонного слоя типична малая модуляция емкости (около 5 пФ) и незначительный гистерезис емкостных характеристик. Характеристики образцов 5 и 6 сходны между собой: вид вольт-фарадных характеристик близок к низкочастотному, наблюдается заметный гистерезис характеристик. Различие хода емкостных характеристик проявляется в инверсии, в обогащении-обеднении различие вида емкостных зависимостей невелико, хотя больше, чем для электронного полупроводника. Модуляция низкочастотной емкости больше для образца с большим составом на поверхности (образец 5),

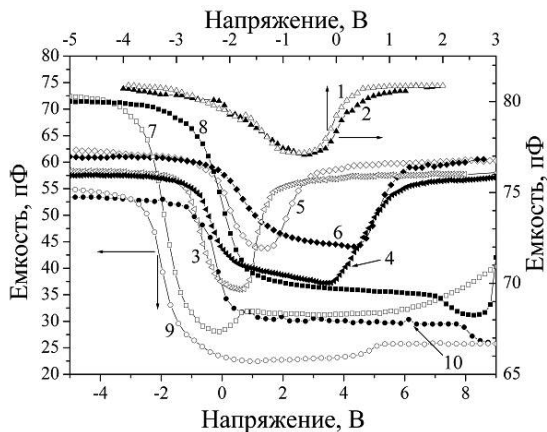


Рис. 5. Вольт-фарадные характеристики МДП-структур на основе $p\text{-HgCdTe}$ (кривые 1, 2 — образец 4; 3, 4 — образец 5; 5, 6 — образец 6; 7, 8 — образец 7; 9, 10 — образец 8) при прямой (1, 3, 5, 7, 9) и обратной (2, 4, 6, 8, 10) развертке напряжения

несмотря на то, что варизонный слой для образца 6 имеет большую толщину (1,6 мкм по сравнению с 0,6 мкм). При увеличении состава на поверхности до 0,49 при толщине варизонного слоя 1,8 мкм (образец 7) вольт-фарадные характеристики на частоте 10 кГц принимают вид, близкий к высокочастотному. Незначительное увеличение емкости наблюдается только при больших отрицательных напряжениях. Также вид емкостных характеристик, близкий к высокочастотному наблюдается для образца 8 (состав на поверхности 0,58, толщина варизонного слоя 1,6 мкм). Для образцов 7 и 8 гистерезис емкостных характеристик проявляется уже в обогащении-обеднении. «Полочка» на вольт-фарадных характеристиках образцов 7 и 8 при обратном направлении развертки напряжения может быть связана с изменением зарядового состояния уровня вблизи границы раздела, который может обмениваться носителями с полупроводником. Таким образом, можно отметить, что при увеличении состава на поверхности наблюдается увеличение гистерезиса емкостных характеристик в инверсии, возрастает модуляция низкочастотной емкости (аналогично случаю $n\text{-HgCdTe}$), при составе на поверхности 0,49 и толщине варизонного слоя 1,6–1,8 мкм вольт-фарадные характеристики принимают вид, близкий к высокочастотному. Высокочастотный вид вольт-фарадных характеристик образцов 7 и 8 может быть связан с увеличением дифференциального сопротивления области пространственного заряда (ОПЗ). Для МДП-структур на основе $n\text{-HgCdTe}$ при увеличении состава на поверхности до 0,70 перехода емкостных характеристик к высокочастотному виду не происходит. Полученные результаты можно объяснить, если рассмотреть соотношение между шириной ОПЗ и толщиной варизонного слоя для электронного и дырочного полупроводника. Для $n\text{-HgCdTe}$ концентрация основных носителей составляла $(3,1\text{--}3,9) \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$, при такой концентрации основных носителей ширина ОПЗ в однородном $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ при $x = 0,22$ составляет около 0,5 мкм. Для КРТ с варизонным слоем аналитических выражений для расчета ширины ОПЗ нет, но ширина ОПЗ в HgCdTe с варизонным слоем с повышенным составом должны превышать ширину ОПЗ для однородного полупроводника. В этом случае часть ОПЗ находится в рабочем слое КРТ и поток генерации неосновных носителей может быть достаточно большим, что препятствует переходу вольт-фарадных характеристик на частоте 10 кГц к высокочастотному виду. Для $p\text{-HgCdTe}$ концентрация основных носителей составляет $(3,4\text{--}8,6) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$, что соответствует ширине ОПЗ $\sim (0,13\text{--}0,2)$ мкм. Эта ширина ОПЗ

существенно меньше толщины варизонного слоя для образцов 7 и 8 (1,8 и 1,6 мкм, соответственно). Таким образом, для существенного увеличения дифференциального сопротивления ОПЗ толщина варизонного слоя должна быть существенно больше, чем ширина ОПЗ.

Заключение

Таким образом, исследованы емкостные характеристики МДП-структур на основе МЛЭ n (p)- $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,22-0,23$) с различными параметрами приповерхностных варизонных слоев с повышенным составом CdTe . Показано, что создание приповерхностных варизонных слоев приводит к увеличению модуляции низкочастотной емкости и гистерезиса вольт-фарадных характеристик в режиме обогащения-обеднения для n - HgCdTe и в инверсии для p - HgCdTe при использовании низкотемпературного двухслойного диэлектрика $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$. Создание «типичных» варизонных слоев (состав на поверхности 0,43–0,48, толщина варизонного слоя 0,5–0,70 мкм) не вызывает заметного уменьшения частоты перехода вольт-фарадных характеристик от низкочастотного к высокочастотному виду. На частоте 1 МГц для МДП-структур на основе n - HgCdTe реализуется промежуточный между низкочастотным и высокочастотным вид вольт-фарадной характеристики, в то время как для МДП-структур на основе p - HgCdTe на частоте 1 МГц может наблюдаться высокочастотный вид вольт-фарадной характеристики независимо от наличия «типичного» варизонного слоя. Величина модуляции низкочастотной емкости зависит, прежде всего, от состава CdTe на поверхности. Увеличение состава на поверхности от 0,45 до 0,7 при толщине верхнего варизонного слоя 0,5–0,8 мкм приводит к более значительной модуляции емкости МДП-структур на основе n - $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,22-0,23$) и увеличению гистерезиса емкостных характеристик при сохранении низкочастотного вида вольт-фарадных характеристик на частоте 10 кГц. Наиболее вероятно, что наблюдаемый гистерезис, типичный для низкотемпературного двухслойного диэлектрика $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$, связан с обратимой инжекцией носителей заряда на состояния в диэлектрике вблизи границы раздела.

Увеличение толщины варизонного слоя до 1,6–1,8 мкм при составе на поверхности 0,49–0,58 приводит к появлению высокочастотного вида вольт-фарадных характеристик МДП-структур на основе p - $\text{Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ на частоте 10 кГц. При толщине верхнего варизонного слоя 0,6 мкм при составе на поверхности 0,44 на частоте 10 кГц наблюдается вид вольт-фарадных характе-

ристик, близкий к низкочастотному. Полученные результаты можно объяснить тем, что значительное увеличение дифференциального сопротивления области пространственного заряда (и снижение частоты перехода емкостных характеристик к высокочастотному виду) происходит при заметном превышении толщиной варизонного слоя ширины ОПЗ. Это условие выполняется для исследованных образцов на основе p - $\text{Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$ с толщиной варизонного слоя 1,6–1,8 мкм, но не выполняется для исследованных МДП-структур на основе n - $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,22-0,23$) из-за меньших толщин варизонных слоев и большей ширины ОПЗ при меньшей концентрации основных носителей. Представляют интерес исследования МДП-структур на основе n - $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,22-0,23$) при больших толщинах варизонного слоя и более высоких концентрациях электронов.

Литература

1. Rogalsky A. Infrared detectors. — 2nd. ed., New York: Taylor & Francis Group, 2011.
2. Овсяк В.Н., Курьшев Г.Л., Сидоров Ю.Г. и др. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона. — Новосибирск: Наука, 2001.
3. Agnihorti O.P., Musca C.A., Faraone L. // Semiconductors Science Technology. 1998. V. 13. P. 839.
4. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M., et al. // Opto-Electronics Review. 2010. V. 18. No. 3. P. 263.
5. Kinch M.A. // Semiconductors and Semimetals. 1981. V. 18. P. 313.
6. Chapman R.A., Borrello S.R., Simmons, A., et al. // Electron Devices, IEEE Transactions on Electron Devices. 1980. V. 27. No. 1. P. 134.
7. Lin C.— H., Liu C. W. // Sensors. 2010. V. 10. P. 8797.
8. Бузанева Е.В. Микроструктуры интегральной электроники. — Москва: Радио и связь, 1990.
9. Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Дзядух С.М. и др. // ФТП. 2008. № 11. С. 1327.
10. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M., et al. // Opto-Electronics Review. 2010. V. 18. No. 3. P. 259.
11. Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Дзядух С.М. и др. // Известия ВУЗов. Физика. 2006. № 10. С. 70.
12. Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Дзядух С.М. // Известия Вузов. Физика. 2009. № 10. С. 3.
13. Овсяк В.Н., Ярцев А.В. // Прикладная физика. 2007. № 5. С. 80.
14. Васильев В.В., Машуков Ю.П. // Прикладная физика. 2010. № 4. С. 106.
15. Васильев В.В., Машуков Ю.П. // ФТП. 2007. № 1. С. 38.
16. Гузев А.А., Варавин В.С., Дворецкий С.А. и др. // Прикладная физика. 2009. № 2. С. 92.
17. Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Дзядух С.М. // Известия ВУЗов. Физика. 2005. № 6. С. 31.

**Influence of parameters of the near-surface graded-gap layers
on capacitive characteristics of MIS structures
based on heteroepitaxial HgCdTe MBE**

A.V. Voitsekhovskii, S.N. Nesmelov, and S.M. Dzyadukh,

SPTI TSU

1 Novosobornaya sq., Tomsk, 634050, Russia

Phone: (3822) 41-27-72. E-mail: vav@elefot.tsu.ru

The effect of the parameters of graded-gap layers with elevated composition of CdTe on the capacitive characteristics of MIS structures based on HgCdTe MBE was experimentally investigated. The characteristics of MIS structures based on n (p) -HgCdTe ($x=0,22-0,23$) with different thickness of near-surface graded-gap layers of different compositions of CdTe on the surface were studied. It is shown that an increase in the composition on the surface and thickness of the graded-gap layers leads to increase of the differential resistance of the space charge region.

PACS: 73.40Qv, 73.21As, 85.60Gz, 73.61Ga.

Keywords: MIS-structure, mercury cadmium telluride, molecular-beam epitaxy, near-surface graded-gap layer.

Bibliography — 17 references

Received January 20, 2013