

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

УДК 621.315.592

А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ,**, С.Н. НЕСМЕЛОВ*,**, С.М. ДЗЯДУХ*,*****ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В МДП-СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ ВАРИЗОННОГО МЛЭ HgCdTe С ДВУХСЛОЙНЫМ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИМ ДИЭЛЕКТРИКОМ SiO₂/Si₃N₄¹**

Проведены исследования вольт-фарадных характеристик (ВФХ) МДП-структур на основе варизонного МЛЭ Hg_{1-x}Cd_xTe ($x = 0.22-0.23$) с двухслойным плазмохимическим диэлектриком SiO₂/Si₃N₄ при изменении направления развертки напряжения. Выявлены особенности ВФХ при прямой и обратной развертке напряжения для МДП-структур на основе *n*-HgCdTe и *p*-HgCdTe. Полученные результаты свидетельствуют о важной роли в гистерезисных явлениях захвата электронов на состоянии переходного слоя между полупроводником HgCdTe и диэлектриком SiO₂. Установлено, что при нанесении диэлектрика вблизи границы раздела образуются примесно-дефектные центры донорного типа, плотность состояний которых в переходном слое составляет $(0.6-2.1) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$.

Ключевые слова: МДП-структура, HgCdTe, молекулярно-лучевая эпитаксия, варизонный слой, вольт-фарадная характеристика, гистерезис вольт-фарадной характеристики, переходный слой на границе раздела диэлектрик – полупроводник.

Введение

Узкозонный твердый раствор теллурида кадмия и ртути широко применяется при создании высокочувствительных инфракрасных детекторов [1–3]. Возможность оптимизации характеристик детекторов на основе Hg_{1-x}Cd_xTe для различных спектральных диапазонов связана с тем, что ширина запрещенной зоны Hg_{1-x}Cd_xTe зависит от состава x (содержания CdTe). Метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) предоставил новые возможности выращивания Hg_{1-x}Cd_xTe с заданным распределением состава по толщине эпитаксиальных пленок, которые используются для управления характеристиками детекторов. Так, например, создание приповерхностных варизонных слоев с повышенным составом позволяет улучшить характеристики детекторов на основе HgCdTe за счет уменьшения влияния поверхностной рекомбинации на время жизни носителей заряда в объеме полупроводника [4]. Развитие метода МЛЭ HgCdTe стимулировало исследования поверхностно-барьерных структур на основе варизонного HgCdTe [5–12]. Установлено, что при использовании двухслойного низкотемпературного плазмохимического диэлектрика SiO₂/Si₃N₄ [13] создание в HgCdTe приповерхностного варизонного слоя приводит к значительному увеличению роли гистерезисных явлений [5, 14]. Гистерезисные явления вызывают нестабильность работы приборов на основе HgCdTe, а также препятствуют корректному определению свойств границы раздела HgCdTe–SiO₂, например, из емкостных измерений [15–18]. Точная и полная информация о свойствах границ раздела и самих диэлектриков необходима при выборе пассивирующих покрытий для инфракрасных детекторов на основе HgCdTe [1, 2]. Гистерезис инжекционного типа ранее изучался для ВФХ МДП-структур на основе других узкозонных полупроводников для систем InSb/анодный оксид [18, 19] и InAs/SiO₂ [20], но гистерезис ВФХ МДП-структур на основе варизонного HgCdTe с двухслойным низкотемпературным плазмохимическим диэлектриком SiO₂/Si₃N₄ ранее не исследовался.

Целью данной работы является исследование гистерезиса ВАХ МДП-структур на основе варизонного Hg_{1-x}Cd_xTe с двухслойным диэлектриком SiO₂/Si₃N₄.

Образцы и методики эксперимента

Исследуемые МДП-структуры изготавливались на основе HgCdTe, выращенного методом МЛЭ на подложках из GaAs(013). При выращивании гетероструктур с обеих сторон рабочего слоя создавались варизонные слои с повышенным компонентным составом CdTe. До нанесения диэлектрических покрытий для исследуемых гетероструктур при помощи метода Холла при темпе-

¹ Работа выполнена при поддержке госзадания № 16.1032.2014/К.

ратуре 78 К были определены концентрации основных носителей, подвижности электронов и проводимости. Время жизни неосновных носителей определялось при помощи бесконтактной СВЧ-методики при температуре 78 К. Технологические параметры некоторых исследованных гетероструктур приведены в табл. 1, электрические параметры гетероструктур – в табл. 2.

Таблица 1

Технологические параметры гетероструктур

№ структуры	Состав на поверхности	Толщина верхнего варизонного слоя, мкм	Толщина нижнего варизонного слоя, мкм	Состав в рабочем слое	Толщина рабочего слоя, мкм
1	0.46	0.7	1.3	0.23	8.3
2	0.49	0.5	2.0	0.21	7.8
3	0.38	0.5	1.6	0.22	8.6
4	0.43	0.	1.3	0.22	8.6
5	0.47	0.	0.9	0.22	8.3
6	0.44	0.3	0.5	0.22	8.2

Таблица 2

Электрические параметры гетероструктур

№ структуры	Концентрация основных носителей, см ⁻³	Подвижность основных носителей, см ² ·В ⁻¹ ·с ⁻¹	Проводимость, Ом ⁻¹ ·см ⁻¹	Время жизни, нс
1	$3.7 \cdot 10^{14}$	70000	4.5	6.5–7.0
2	$2.4 \cdot 10^{14}$	85000	3.5	5.0–7.0
3	$2.6 \cdot 10^{15}$	560	0.24	0.02–0.03
4	$4.7 \cdot 10^{14}$	88000	6.8	3.6–4.1
5	$5.6 \cdot 10^{15}$	540	0.49	-
6	$1.2 \cdot 10^{16}$	480	0.94	-

Структура № 1 создавалась в двух вариантах: для одной части гетероструктуры диэлектрик наносился поверх варизонного слоя, для другой – проводилось предварительное удаление приповерхностного варизонного слоя путем травления поверхности в растворе Br₂–HBr, а затем наносился двухслойный диэлектрик SiO₂/Si₃N₄. Для структуры № 1 с варизонным слоем в качестве диэлектрика использовался также анодный оксид. Для структуры № 3 в качестве диэлектрика использовался CdTe, сформированный *in situ* в процессе эпитаксиального роста. Для структур № 2, 4–6 поверх варизонного слоя наносился низкотемпературный двухслойный диэлектрик SiO₂/Si₃N₄. Эпитаксиальные пленки № 1, 2, 4 имели электронный тип проводимости, а № 3, 5, 6 – дырочный.

Распределение состава по толщине эпитаксиальной пленки для структуры № 1, измеренное автоматическим эллипсометром в процессе роста, показано на рис. 1. На вставке рис. 1 схематически изображены исследуемые МДП-структуры: 1 – подложка из GaAs (013); 2 – буферный слой из ZnTe толщиной 0.1 мкм; 3 – буферный слой из CdTe толщиной 6.2 мкм; 4 – нижний варизонный слой с повышенным составом; 5 – рабочий слой HgCdTe; 6 – верхний варизонный слой с повышенным составом; 7 – слой SiO₂; 8 – слой Si₃N₄; 9 – полевой электрод из In; 10 – тыловой контакт к эпитаксиальной пленке.

Для формирования двухслойного диэлектрика SiO₂/Si₃N₄ использовалась установка с пространственным разделением областей возбуждения высокочастотного разряда и расположения подложек HgCdTe, что позволило исключить ионное и электронное воздействие плазмы на поверхность полупроводника [13]. В качестве исходных реагентов при синтезе слоев SiO₂ были использованы 5 %-я смесь моносилана в аргоне, закись азота и гелий. Температура синтеза составляла 90 °С, толщина слоя SiO₂ была близка к 70 нм, а толщина Si₃N₄ – к 30 нм.

Измерения проводились на автоматизированной установке спектроскопии адмиттанса нано-гетероструктур на базе неоптического криостата Janis и измерителя иммитанса Agilent E4980A (температурный диапазон 8–475 К, диапазон измеряемого полного сопротивления до 1 ГОм с разрешением по емкости и нормированной на частоту проводимости до 1 фФ, диапазон выставляемого напряжения –40 ÷ +40 В, частоты – 20 Гц – 2 МГц). Установка позволяла проводить измерения емкости и проводимости МДП-структур на основе HgCdTe в зависимости от напряжения смеще-

ния, частоты тестового сигнала и температуры. При измерении полевых зависимостей емкости и проводимости за прямое направление развертки принимается изменение напряжения от отрицательных значений к положительным, а за обратное направление развертки – от положительных к отрицательным.

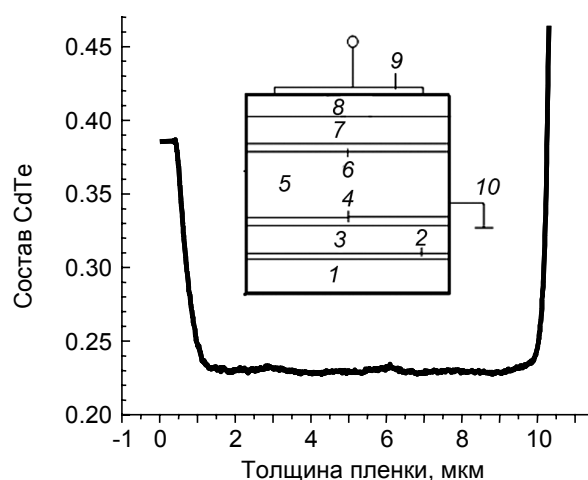


Рис. 1. Распределение состава по толщине структуры № 1 на основе гетероэпитаксиального $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, выращенного методом МЛЭ. На вставке – схематическое изображение исследуемых МДП-структур с двухслойным диэлектриком ($\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$)

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 2 показаны ВФХ МДП-структур на основе варизонного МЛЭ $n\text{-HgCdTe}$ с анодным оксидом (структура №1) и варизонного МЛЭ $p\text{-HgCdTe}$ с CdTe (структура № 3) в качестве диэлектриков. Измерения проведены на частоте 10 кГц при 77 К при прямой и обратной развертках напряжения. Различия в значениях емкостей диэлектрика связаны со значительно большими значениями диэлектрической проницаемости для анодного оксида. Для МДП-структуры с анодным оксидом типичен положительный фиксированный заряд и значительный гистерезис, который наблюдается как в обеднении, так и в инверсии. Для структуры на основе варизонного HgCdTe с CdTe гистерезис практически отсутствует. Из рис. 2 следует, что различие хода ВФХ при изменении направления развертки напряжения (гистерезис) зависит от используемого в МДП-структуре диэлектрика.

На рис. 3 приведены ВФХ МДП-структуры на основе $n\text{-HgCdTe}$ с двухслойным диэлектриком $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ с варизонным слоем и без такого слоя, измеренные при 77 К на частоте 10 кГц при различных направлениях развертки напряжения. Из рисунка следует, что создание варизонного слоя с повышенным содержанием CdTe приводит к увеличению глубины и ширины провала на низкочастотной ВФХ, а также к значительному увеличению гистерезиса ВФХ [5,14]. Для ряда МДП-структур с низкотемпературным плазмохимическим двухслойным диэлектриком $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ гистерезис ВФХ для варизонного $n\text{-HgCdTe}$ практически отсутствует в инверсии, но значителен в обеднении (кривые 1 и 2).

На рис. 4 и 5 показаны ВФХ МДП-структуры на основе варизонного $n\text{-HgCdTe}$ и $p\text{-HgCdTe}$ соответственно, измеренные на частоте 10 кГц при различных температурах и направлениях развертки напряжения. Из рисунков видно, что гистерезис уменьшается при охлаждении структур от 77 до 8(20) К, причем при низких температурах на ВФХ появляются максимумы, которые могут быть связаны с емкостью моноэнергетического уровня поверхностных состояний с высокой плотностью. Для МДП-структуры на основе $n\text{-HgCdTe}$ (рис. 4) охлаждение приводит к уменьшению емкости в режиме сильной инверсии на 10 кГц, что связано с уменьшением частоты перехода ВФХ к высокочастотному виду при уменьшении температуры [11]. Значение емкости в минимуме низкочастотной ВФХ для $n\text{-HgCdTe}$ больше при прямой развертке напряжения, а для $p\text{-HgCdTe}$ – при обратной развертке напряжения. Различие емкостей в минимуме низкочастотной ВФХ более выражено для структур на основе электронного HgCdTe. Как правило, при 77 К наклон ВФХ в обеднении для $n\text{-HgCdTe}$ и в инверсии для $p\text{-HgCdTe}$ более пологий при прямой развертке напряжения, чем при обратной развертке напряжения (кривые 1 и 2 на рис. 4 и 5). В то же время наклон

ВФХ в инверсии для n -HgCdTe и в обеднении для p -HgCdTe более пологий при обратной развертке напряжения, чем при прямой развертке напряжения (рис. 5, кривые 1 и 2).

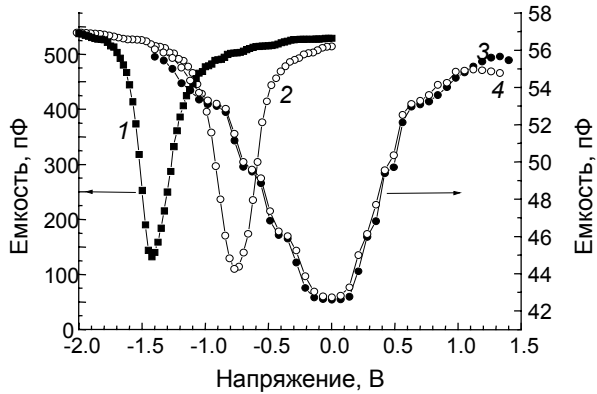


Рис. 2. ВФХ МДП-структур на основе варизонного n -HgCdTe (структура № 1) с анодным оксидом (кр. 1 и 2) и p -HgCdTe (структура № 3) с CdTe (кр. 3 и 4), измеренные при температуре 77 К на частоте 10 кГц при прямой (кр. 1 и 3) и обратной (кр. 2 и 4) развертках напряжения

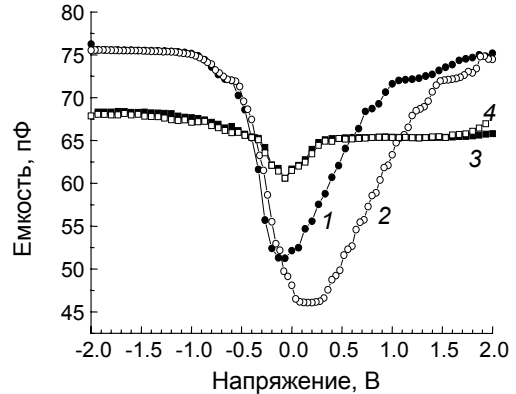


Рис. 3. ВФХ МДП-структур на основе n -HgCdTe (структура № 1) с двухслойным диэлектриком $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ с варизонным слоем (кр. 1 и 2) и без него (кр. 3 и 4), измеренные при 77 К на частоте 10 кГц при прямой (кр. 1 и 3) и обратной (кр. 2 и 4) развертках напряжения

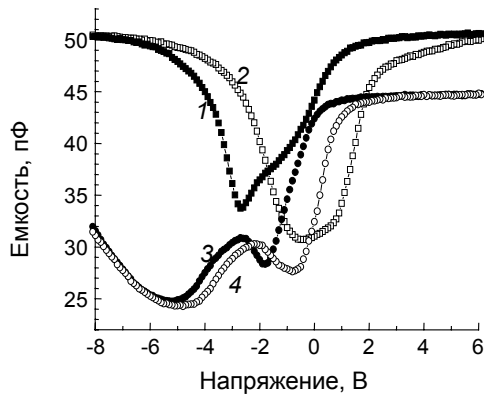


Рис. 4. ВФХ МДП-структуры на основе варизонного n -HgCdTe (структура № 4) с $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$, измеренные на частоте 10 кГц при температурах 77 К (кр. 1 и 2) и 8 К (кр. 3 и 4) при прямой (кр. 1 и 3) и обратной (кр. 2 и 4) развертках напряжения. Для наглядности кр. 3 и 4 смещены в сторону меньших емкостей на 3 пФ

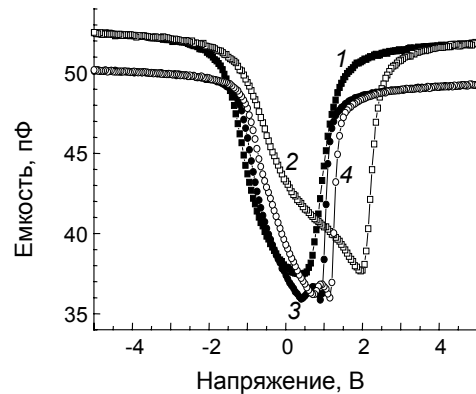


Рис. 5. ВФХ МДП-структуры на основе варизонного p -HgCdTe (структура № 6) с $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$, измеренные на частоте 10 кГц при температурах 77 К (кр. 1 и 2) и 20 К (кр. 3 и 4) при прямой (кр. 1 и 3) и обратной (кр. 2 и 4) развертках напряжения

На рис. 6 и 7 приведены ВФХ МДП-структур на основе варизонных n -HgCdTe и p -HgCdTe соответственно, измеренные при 77 К на частотах 200 и 50 кГц при различных направлениях развертки напряжения и разных диапазонах изменения напряжения. Из рис. 6 видно, что увеличение исходного положительного напряжения при обратной развертке для структуры № 2 на основе n -HgCdTe приводит к смещению минимума ВФХ в область положительных напряжений, причем возрастает область напряжений в инверсии, при которой величина емкости относительно слабо зависит от напряжения. При прямой развертке напряжения наблюдается более пологая зависимость емкости от напряжения в режиме обеднения, чем при обратной развертке напряжения. Для МДП-структуры на основе варизонного p -HgCdTe (структура № 5) увеличение исходного положительного напряжения при обратной развертке приводит к сдвигу ВФХ в инверсии в сторону больших положительных напряжений, а также к расширению области напряжений в обеднении, при которой емкость относительно слабо зависит от напряжения. При прямой развертке напряжения

увеличение исходного положительного напряжения вызывает сдвиг ВФХ в обеднении в сторону больших отрицательных напряжений, а также к расширению минимума ВФХ.

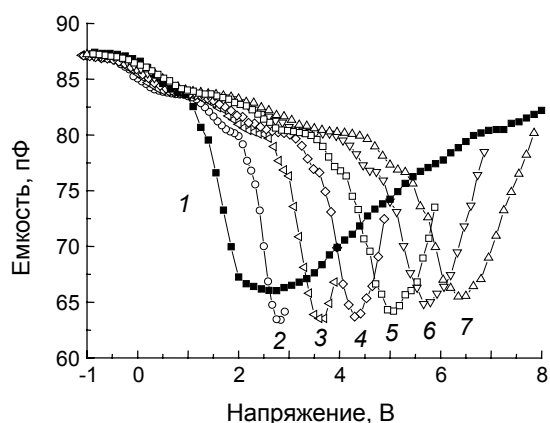


Рис. 6. ВФХ МДП-структуры на основе варизонного n -HgCdTe (структура № 2) с $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$, измеренные при 77 К на частоте 200 кГц при прямой развертке напряжения (кр. 1) и при обратной развертке напряжения при разных начальных положительных напряжениях: 3 В – кр. 2; 4 В – кр. 3; 5 В – кр. 4; 6 В – кр. 5; 7 В – кр. 6; 8 В – кр. 7

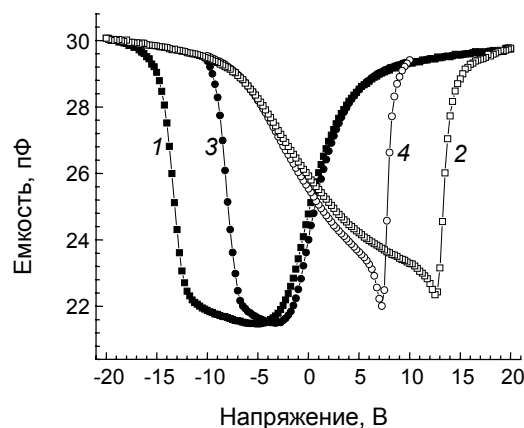


Рис. 7. ВФХ МДП-структуры на основе варизонного p -HgCdTe (структура № 5) с $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$, измеренные при 77 К на частоте 50 кГц при прямой развертке напряжения (кр. 1 и 3) и при обратной развертке напряжения (кр. 2 и 4), причем кр. 1 и 2 соответствуют диапазону $(-20 \div +20 \text{ В})$, а кр. 3 и 4 – диапазону $(-10 \div +10 \text{ В})$

На рис. 8 и 9 приведены ВФХ МДП-структур на основе варизонного n -HgCdTe (структура № 4), измеренные при 77 К на частоте 20 кГц при различных направлениях развертки напряжения и разных начальных напряжениях смещения.

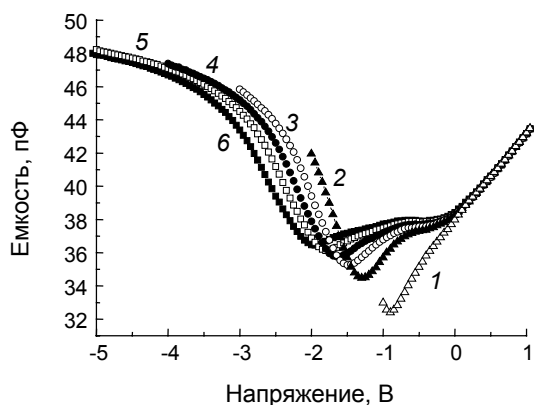


Рис. 8. ВФХ МДП-структуры на основе варизонного n -HgCdTe (структура № 4) с $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$, измеренные при 77 К на частоте 20 кГц при прямой развертке напряжения при разных начальных отрицательных напряжениях: -1 В – кр. 1; -2 В – кр. 2; -3 В – кр. 3; -4 В – кр. 4; -5 В – кр. 5; -6 В – кр. 6

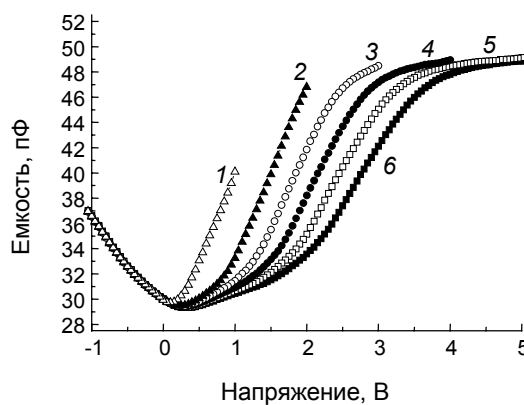


Рис. 9. ВФХ МДП-структуры на основе варизонного p -HgCdTe (структура № 4) с $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$, измеренные при 77 К на частоте 20 кГц при обратной развертке напряжения при разных начальных положительных напряжениях: 1 В – кр. 1; 2 В – кр. 2; 3 В – кр. 3; 4 В – кр. 4; 5 В – кр. 5; 6 В – кр. 6

Из рис. 8 видно, что увеличение исходного отрицательного напряжения при прямой развертке напряжения для структуры № 4 на основе n -HgCdTe приводит к смещению ВФХ в режиме инверсии в область более отрицательных напряжений, причем возрастает область напряжений в обеднении, при которой величина емкости относительно слабо зависит от напряжения, а кроме того, увеличивается значение емкости в минимуме ВФХ. При обратной развертке напряжения при увеличении начальных положительных напряжений смещения наблюдается сдвиг ВФХ в режиме обеднения в область положительных напряжений, а также более широкий минимум емкости харак-

теристики, вблизи которого проявляется пологая зависимость емкости от напряжения. Зависимости сдвига ВФХ в режиме обеднения от начального отрицательного напряжения при прямой развертке напряжения не наблюдается, так же как отсутствует зависимость вида ВФХ в инверсии от начального положительного напряжения при обратной развертке напряжения.

Сформулируем основные особенности ВФХ МДП-структур на основе HgCdTe ($x = 0.22\text{--}0.23$)/ $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ с приповерхностным варизонным слоем с повышенным составом CdTe при прямой и обратной развертке напряжения.

Для МДП-структур на основе $n\text{-HgCdTe}/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ с варизонным слоем при прямой развертке напряжения меньше модуляция емкости (большее значение емкости в минимуме низкочастотной ВФХ). Для МДП-структур на основе $p\text{-HgCdTe}/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ с варизонным слоем при прямой развертке напряжения больше модуляция емкости (меньшее значение емкости в минимуме низкочастотной ВФХ). Различие значений емкости в минимуме ВФХ при разных направлениях развертки напряжения для МДП-структур на основе $p\text{-HgCdTe}$ менее выражено, чем для $n\text{-HgCdTe}$.

Для МДП-структур на основе $n\text{-HgCdTe}/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ с варизонным слоем наклон ВФХ в обеднении при прямой развертке напряжения более пологий, чем при обратной развертке. Для МДП-структур на основе $p\text{-HgCdTe}/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ с варизонным слоем наклон ВФХ в обеднении при прямой развертке напряжения, как правило, более резкий, чем при обратной развертке. Для МДП-структур на основе $n\text{-HgCdTe}/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ с варизонным слоем наклон ВФХ в начале инверсии при обратной развертке напряжения более пологий, чем при прямой развертке. Для МДП-структур на основе $p\text{-HgCdTe}/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ с варизонным слоем наклон ВФХ в начале инверсии при обратной развертке напряжения более резкий, чем при прямой развертке. Для МДП-структур на основе $p\text{-HgCdTe}/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ с варизонным слоем обычно при обратной развертке наблюдается пологий участок в области обеднения. Подтверждением достоверности выявленных особенностей ВФХ являются результаты работ [6, 7], в которых приведены экспериментальные ВФХ с перечисленными выше особенностями для аналогичных структур, но причины данного вида ВФХ не обсуждаются.

Для МДП-структур на основе $n(p)\text{-HgCdTe}/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ с варизонным слоем гистерезис ВФХ уменьшается при снижении температуры и зависит от диапазона изменения напряжения.

Различие значений емкости в минимуме низкочастотной ВФХ при прямой и обратной развертках напряжения достаточно неожиданно. Емкость в минимуме низкочастотной ВФХ зависит от емкости диэлектрика и концентрации легирующей примеси (основных носителей) [21]. Минимум емкости на низкочастотной ВФХ наблюдается при поверхностном потенциале, который приблизительно соответствует началу сильной инверсии [22, 23]. При помощи численного решения уравнения Пуассона с учетом варизонных слоев построены идеальные низкочастотные ВФХ для структур № 4 (рис. 10, кривая 3) и № 6 (рис. 11, кривая 3) для концентраций основных носителей $4.7 \cdot 10^{14}$ и $1.2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ соответственно, определенных ранее методом Холла. Из рис. 10 и 11 видно, что значения емкостей в минимумах низкочастотных ВФХ, измеренных при различных направлениях развертки напряжения, не соответствуют расчетным значениям. Лучшее согласие экспериментальных и расчетных значений емкостей в минимуме ВФХ получается при определении концентрации примеси по наклону $1/C^2(V)$ зависимости в режиме обеднения по методике, изложенной в [24]. Для определения концентрации примеси использовались ВФХ, измеренные при обратной развертке напряжения. Этим способом для структур № 4 и 6 определены значения концентраций основных носителей, которые составили $1.8 \cdot 10^{15}$ и $4.2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ соответственно.

Объяснение полученных результатов для МДП-структур на основе варизонного HgCdTe с $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ возможно в рамках представлений о зарядовом обмене между полупроводником и переходным слоем на границе раздела $\text{HgCdTe}/\text{SiO}_2$.

Очевидно, что вблизи границы раздела $\text{HgCdTe}/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ в приповерхностном варизонном слое концентрация основных носителей заряда не соответствует величине, установленной методом Холла для HgCdTe без пассивирующего покрытия $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$, поскольку вблизи границы раздела при нанесении диэлектрика, по-видимому, образуются дефекты донорного типа. Это приводит к увеличению экспериментальной емкости в минимуме ВФХ для МДП-структур на основе варизонного $n\text{-HgCdTe}$ (уменьшению емкости для $p\text{-HgCdTe}$). Для подтверждения наблюдений о различии наклонов ВФХ при различных направлениях развертки напряжения на рис. 12 показаны зависимости производной емкости по напряжению от напряжения для МДП-структур на основе $n(p)\text{-HgCdTe}$ (структуры № 4 и 6) при прямой и обратной развертке напряжения. Большие значения производной соответствуют более резкому изменению емкостной зависимости.

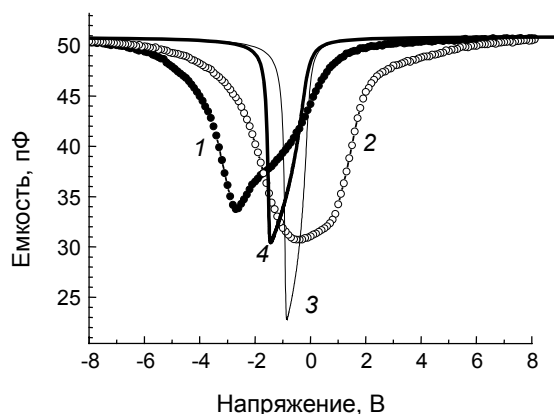


Рис. 10. ВФХ МДП-структуры на основе варизонного n -HgCdTe (структура № 4) с $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$, измеренные на частоте 10 кГц при 77 К при прямой (кр. 1) и обратной (кр. 2) развертке напряжения, а также идеальные ВФХ, рассчитанные при концентрации донорной примеси $4.7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ (кр. 3) и $1.8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (кр. 4)

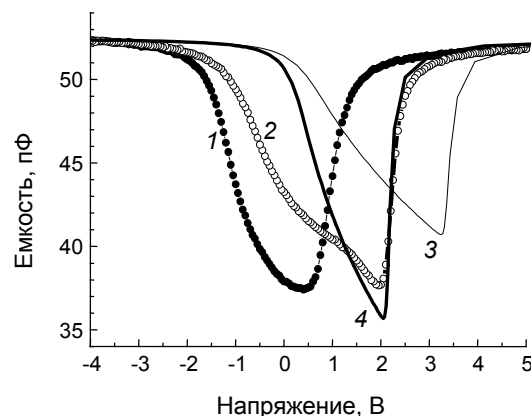


Рис. 11. ВФХ МДП-структуры на основе варизонного p -HgCdTe (структура № 6) с $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$, измеренные на частоте 10 кГц при 77 К при прямой (кр. 1) и обратной (кр. 2) развертке напряжения, а также идеальные ВФХ, рассчитанные при концентрации донорной примеси $1.2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (кр. 3) и $4.2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (кр. 4)

На границе раздела HgCdTe/SiO₂ находится обогащенный дефектами переходный слой, который содержит примесно-дефектные центры, способные обмениваться зарядом с полупроводником, причем часть из них может обладать подлегирующим действием. Этим можно объяснить большие значения экспериментальной емкости в минимуме ВФХ при прямой развертке напряжения (по сравнению с обратной) для МДП-структур на основе варизонного n -HgCdTe. Обмен зарядами между состояниями в переходном слое с полупроводником приводит к гистерезису ВФХ для системы варизонный HgCdTe/SiO₂/Si₃N₄.

Наиболее вероятно, что гистерезис инжекционного типа в системе варизонный HgCdTe/SiO₂/Si₃N₄ связан с захватом электронов на уровни примесно-дефектных центров в переходном слое, а также выбросом электронов с этих уровней. При положительном напряжении электроны захватываются на состояния примесно-дефектных центров в переходном слое (в том числе донорного типа), при этом накапливается отрицательный заряд в переходном слое и уменьшается концентрация ионизованных донорных состояний. Вследствие этого емкость в минимуме низкочастотной ВФХ для МДП-структур на основе варизонного n -HgCdTe принимает несколько меньшие значения при обратной развертке, чем при прямой развертке напряжения. Различие наклонов ВФХ в обеднении при прямой и обратной развертке напряжения может быть связано с тем, что для МДП-структур на основе варизонного n -HgCdTe при прямой развертке напряжения в обеднении (для p -HgCdTe в инверсии) происходит захват электронов на уровни переходного слоя. При этом реализуется более пологая зависимость поверхностного потенциала от напряжения в обеднении при прямой развертке напряжения из-за экранирования внешнего поля при перезарядке уровней. Выброс электронов с уровней переходного слоя в полупроводник происходит для МДП-структур на основе варизонного n -HgCdTe в инверсии или сильной инверсии (в обеднении для p -HgCdTe) и может наблюдаться в виде пологого участка ВФХ в инверсии при обратной развертке напряжения. При изменении зарядового состояния уровней становится более пологая зависимость поверхностного потенциала от напряжения (аналогично действию на ВФХ поверхностных состояний).

Измерения ВФХ МДП-структур на основе варизонного HgCdTe при прямой и обратной развертке напряжения позволяют сделать некоторые количественные оценки. Концентрации донорных центров в приповерхностном слое полупроводника, образующихся при пассивации диэлектриком SiO₂/Si₃N₄, точно определить сложно, поскольку исходная концентрация примеси в приповерхностном слое (до пассивации) может отличаться от интегральной концентрации, определенной холловским методом. Поскольку, согласно холловским данным, концентрация основных носителей убывает при увеличении состава в варизонном слое, то для МДП-структур на основе ва-

ризонного n -HgCdTe можно оценить минимальную концентрации доноров, образовавшихся при пассивации, предполагая, что концентрация основных носителей в приповерхностном слое равна интегральной, найденной методом Холла. Так, получено, что для структуры № 4 концентрация донорных центров, введенных при пассивации, превышает $1.33 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Для МДП-структуры на основе варизонного p -HgCdTe определенная таким же способом концентрация доноров, введенных при пассивации, составляет $7.8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Различие экспериментальных значений емкости в минимуме ВФХ при разных направлениях развертки напряжения позволяет оценить концентрацию дефектов донорного типа, которые локализованы вблизи границы раздела и могут изменять зарядовое состояние при изменении напряжения смещения. На рис. 13 показана зависимость емкости полупроводника в минимуме низкочастотной ВФХ при 77 К от концентрации ионизованной примеси для МДП-структуры на основе $\text{Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$, рассчитанная путем численного решения уравнения Пуассона при температуре 77 К для случая варизонного слоя при составе на поверхности 0.46 и толщине варизонного слоя 0.3 мкм. Также приведена аналогичная зависимость для структуры того же состава без варизонного слоя.

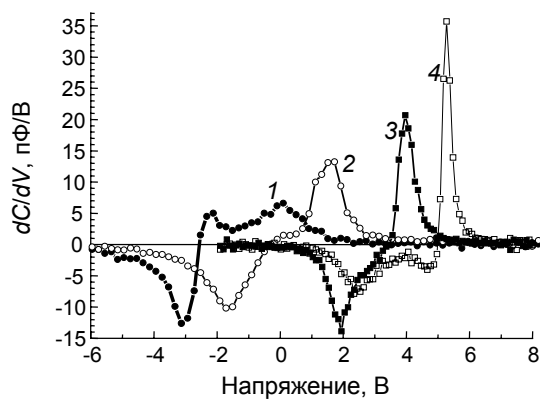


Рис. 12. Зависимости от напряжения производной емкости по напряжению для МДП-структур на основе варизонного n -HgCdTe (структура № 4 – кр. 1 и 2) и p -HgCdTe (структура № 6 – кр. 3 и 4) с $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$, измеренные на частоте 10 кГц при 77 К при прямой (кр. 1 и 3) и обратной (кр. 2 и 4) развертке напряжения; кр. 3 и 4 смещены на 3 В в сторону больших положительных напряжений

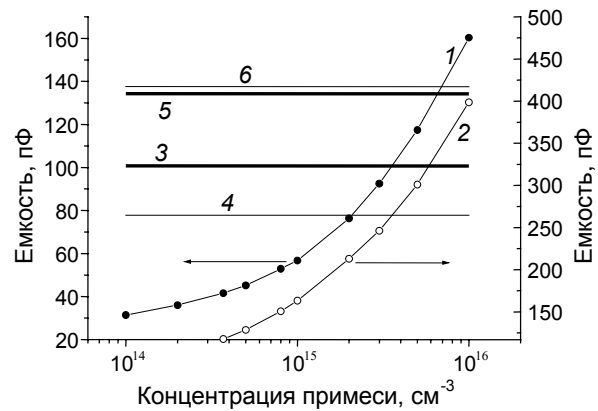


Рис. 13. Расчетная зависимость емкости полупроводника в минимуме низкочастотной ВФХ при 77 К от концентрации ионизованной примеси для МДП-структуры на основе $\text{Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$ с варизонным слоем (кр. 1) и без него (кр. 2). Горизонтальными линиями показаны уровни емкости полупроводника в минимуме низкочастотной ВФХ для МДП-структур на основе n -HgCdTe (структура № 4 – кр. 3 и 4) и p -HgCdTe (структура № 6 – кр. 5 и 6) при прямой (кр. 3 и 5) и обратной (кр. 4 и 6) развертке напряжения

Значения емкости полупроводника в минимуме низкочастотной ВФХ для МДП-структур на основе $n(p)$ -HgCdTe при прямой и обратной развертке напряжения характеризуются горизонтальными линиями. Из рис. 13 видно, что эффективная концентрация примеси в области пространственного заряда будет отличаться по величине в зависимости от направления развертки напряжения. Для n -HgCdTe полученная эффективная концентрация ионизованных доноров больше при прямой развертке напряжения (на величину $1.48 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$), а для p -HgCdTe эффективная концентрация ионизованных акцепторов больше (на величину $3.71 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$) при обратной развертке напряжения ВФХ. Рассчитанные значения плотности дефектов вблизи границы раздела, обладающих подлежащим действием и изменяющих зарядовое состояние при изменении напряжения, составили $3.77 \cdot 10^{10}$ и $6.18 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ для n -HgCdTe и p -HgCdTe соответственно. Полные плотности перезаряжающихся состояний в переходном слое, определенные по сдвигу ВФХ в обеднении, составили $2.08 \cdot 10^{11}$ и $5.82 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ для n -HgCdTe и p -HgCdTe соответственно. Следует отметить, что для образцов p -типа плотность подлежащих дефектов, перезаряжающихся при изменении напряжения смещения, в большинстве случаев существенно меньше, чем для образцов n -типа, а полные плотности перезаряжающихся состояний в переходном слое, по-видимому, зависят от технологии нанесения диэлектрика и могут быть близкими для структур на основе n -HgCdTe и

p-HgCdTe. Из проведенных оценок следует, что только часть состояний вблизи границы раздела обладают подлежащим действием.

Проведены измерения ВФХ МДП-структуры на основе варизонного *n*-HgCdTe при 77 К при различных направлениях развертки в диапазоне частот 10 кГц – 1 МГц. В этом частотном диапазоне сохраняются основные особенности гистерезиса ВФХ при прямой и обратной развертках напряжения. Наблюдается различие значений емкостей в минимуме ВФХ, сдвиг ВФХ по оси напряжений, а также разная крутизна наклонов в обеднении и инверсии при прямой и обратной развертках напряжения. Зависимость вида ВФХ от частоты обусловлена переходом характеристик к высокочастотному виду, а также влиянием сопротивления объема эпитаксиальной пленки на измеряемую емкость на высоких частотах. Частотная дисперсия ВФХ, связанная с перезарядкой дефектов в переходном слое, не наблюдается, поскольку захват электронов на состояния примесно-дефектных центров и выброс их оттуда происходят при различных значениях напряжения смещения.

Причины увеличения гистерезиса ВФХ при создании приповерхностного варизонного слоя остаются дискуссионными. Можно отметить, что исследования при помощи методов микроскопии показали, что концентрация дефектов у поверхности значительно выше для структуры с приповерхностным варизонным слоем с повышенным содержанием CdTe [25]. Более высокая дефектность HgCdTe вблизи границы раздела может приводить к гистерезисным явлениям, которые практически отсутствуют для HgCdTe без варизонного слоя.

Заключение

Проведены экспериментальные исследования ВФХ МДП-структур на основе гетероэпитаксиального варизонного МЛЭ $n(p)$ -Hg_{1-x}Cd_xTe ($x = 0.22-0.23$) с низкотемпературным двухслойным диэлектриком SiO₂/Si₃N₄. Установлено, что вид ВФХ в широком диапазоне температур зависит от направления изменения напряжения при измерениях (направления развертки напряжения) и диапазона изменения напряжения. Установлены особенности ВФХ МДП-структур на основе $n(p)$ -HgCdTe с приповерхностным варизонным слоем с повышенным компонентным составом CdTe при прямой и обратной развертках напряжения.

Для МДП-структур на основе варизонного *n*-HgCdTe/SiO₂/Si₃N₄ при прямой развертке напряжения наблюдаются большие значения емкости в минимуме низкочастотной ВФХ, чем при обратной развертке напряжения. Для МДП-структур на основе *p*-HgCdTe/SiO₂/Si₃N₄ с варизонным слоем при прямой развертке напряжения в минимуме ВФХ наблюдаются меньшие значения емкости, чем при обратной развертке напряжения. Для МДП-структур на основе варизонного *n*-HgCdTe наклон ВФХ в обеднении при прямой развертке напряжения более пологий, чем при обратной. Для структур на основе *p*-HgCdTe наклон ВФХ в инверсии при прямой развертке напряжения более пологий, чем при обратной развертке. Более пологий наклон ВФХ наблюдается при обратной развертке напряжения для МДП-структур на основе *n*-HgCdTe в инверсии, а для МДП-структур на основе *p*-HgCdTe в обеднении. Для МДП-структур на основе варизонного $n(p)$ -HgCdTe/SiO₂/Si₃N₄ гистерезис ВФХ уменьшается при снижении температуры. Гистерезис ВФХ зависит от диапазона изменения напряжения.

Объяснение полученных результатов возможно в рамках представлений об обмене электронами между HgCdTe и состояниями примесно-дефектных центров разупорядоченного переходного слоя между HgCdTe и SiO₂. Предполагается, что вблизи границы раздела при нанесении SiO₂/Si₃N₄ образуется некоторое количество дефектов донорного типа. На границе HgCdTe/SiO₂ находится разупорядоченный переходный слой, который содержит примесно-дефектные центры, способные обмениваться зарядами с HgCdTe, причем часть из них может обладать подлежащим действием. Наиболее вероятно, что гистерезис инжекционного типа в системе варизонный HgCdTe/SiO₂/Si₃N₄ связан с захватом электронов на уровни примесно-дефектных центров в переходном слое, а также выбросом электронов с этих уровней. Различие наклонов ВФХ при прямой и обратной развертке напряжения может быть связано с тем, что при изменении зарядового состояния примесно-дефектных центров зависимость поверхностного потенциала от напряжения становится более полой.

Измерения ВФХ МДП-структур на основе варизонного HgCdTe при прямой и обратной развертке напряжения позволяют сделать некоторые количественные оценки. Концентрации донорных центров в приповерхностном слое полупроводника, образующихся при пассивации диэлек-

триком $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$, находятся в диапазоне $(1.3-7.8) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Полные плотности состояний в переходном слое, перезаряжающихся при изменении напряжения смещения, составили $2.08 \cdot 10^{11}$ и $5.82 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ для $n\text{-HgCdTe}$ и $p\text{-HgCdTe}$ соответственно. Значения плотности примесно-дефектных центров вблизи границы раздела, обладающих подлежащим действием и изменяющих зарядовое состояние при изменении напряжения, составили $3.77 \cdot 10^{10}$ и $6.18 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ для $n\text{-HgCdTe}$ и $p\text{-HgCdTe}$ соответственно.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИФП СО РАН В.С. Варавину, В.В. Васильеву, С.А. Дворецкому, Н.Н. Михайлову, М.В. Якушеву и И.О. Парму за предоставленные структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chu J. and Sher A. Device Physics of Narrow Gap Semiconductors. – N. Y.: Springer, 2010. – 506 p.
2. Rogalski A. Infrared detectors. – 2nd. ed. – N. Y.: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011. – 876 p.
3. Войцеховский А.В., Давыдов В.Н. Фотоэлектрические МДП-структуры из узкозонных полупроводников. – Томск: Радио и связь, 1990. – 327 с.
4. Овсяк В.Н., Курышев Г.Л., Сидоров Ю.Г. и др. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона. – Новосибирск: Наука, 2001. – 376 с.
5. Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Дзядух С.М. и др. // ФТП. – 2008. – № 11. – С. 1327–1332.
6. Ovsyuk V.N. and Yartsev A.V. // Proc. SPIE. – 2007. – V. 6636. – P. 663617–663621.
7. Овсяк В.Н., Ярцев А.В. // Прикладная физика. – 2007. – № 5. – С. 80–83.
8. Васильев В.В., Машуков Ю.П. // ФТП. – 2007. – Т. 41. – № 1. – С. 38–43.
9. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., and Dzyadukh S.M. // Thin Solid Films. – 2014. – V. 551. – P. 92–97.
10. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., and Dzyadukh S.M. // Opto-Electronic Rev. – 2014. – V. 22. – No. 4. – P. 236–244.
11. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M., et al. // Russ. Phys. J. – 2014. – V. 57. – No. 4. – P. 536–544.
12. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M., et al. // Russ. Phys. J. – 2014. – V. 57. – No. 5. – P. 633–641.
13. Васильев В.В., Войцеховский А.В., Дульцев Ф.Н. и др. // Прикладная физика. – 2007. – № 5. – С. 63–66.
14. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., and Dzyadukh S.M. // Thin Solid Films. – 2012. – V. 522C. – P. 261–266.
15. Buxo J., Esteve D., Farre J., et al. // Appl. Phys. Lett. – 1978. – V. 33. – No. 11. – P. 969–971.
16. Tüttő P. and Balázs J. // Solid-State Electron. – 1982. – V. 25. – No. 1. – P. 45–48.
17. Sah C.T., Lin W.W.L., Pan S.C.S., et al. // Appl. Phys. Lett. – 1986. – V. 48. – No. 12. – P. 782–784.
18. Nakagawa T. and Fujisada H. // Appl. Phys. Lett. – 2008. – V. 31. – No. 5. – P. 348–350.
19. Nakagawa T. and Fujisada H. // IEE Proceedings I (Solid-State and Electron Devices). – 1984. – V. 131. – No. 2. – P. 51–55.
20. Ковчавцев А.П. Структуры металл-диэлектрик-полупроводник на основе арсенида индия: дис. ... докт. физ.-мат. наук. – Новосибирск, 2003. – 383 с.
21. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Энергия, 1973. – 656 с.
22. Овсяк В.Н. Электронные процессы в полупроводниках с областями пространственного заряда. – Новосибирск: Наука, 1984. – 253 с.
23. Литовченко В.Г., Горбань А.П. Основы физики микроэлектронных систем металл – диэлектрик – полупроводник. – Киев: Наукова думка, 1978. – 316 с.
24. Колешко В.М. // Обзоры по электронной технике. – 1977. – Вып. 2(465). – 82 с.
25. Кашуба А.С., Заболоцкий А.В., Коростылев Е.В. и др. // Вестник МИТХТ. – 2010. – Т. 3. – № 5. – С. 19–23.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 10.12.14.

**Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова
Томского государственного университета, г. Томск, Россия
E-mail: vav43@mail.tsu.ru