

УДК 621.315.592

## ВЛИЯНИЕ СТУПЕНЧАТОГО ПРОФИЛЯ СОСТАВА НА ФОРМИРОВАНИЕ ИНВЕРСИИ В ПЛЁНКАХ МАТЕРИАЛА КАДМИЙ—РТУТЬ—ТЕЛЛУР

© В. А. Стучинский, А. В. Вишняков, Г. Ю. Сидоров

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13  
E-mail: stuchin@isp.nsc.ru*

В контексте задачи обеспечения условий для нормальной работы фотоприёмных диодных матриц изучено влияние ступенчатого профиля состава на формирование инверсии в плёнках материала кадмий—ртуть—теллур (КРТ) под действием встроенного заряда  $Q_i$  изолирующего диэлектрика. Дан анализ задачи максимизации предельно допустимой величины  $Q_i$ , ещё не приводящей к формированию в системе инверсии, посредством варьирования параметров системы: величины разрыва краёв зон для носителей заряда в КРТ, толщины широкозонного поверхностного КРТ-слоя, температуры и уровня легирования двухслойной плёнки материала КРТ.

*Ключевые слова:* фотоприёмное устройство, фотодиодная матрица, кадмий—ртуть—теллур, область пространственного заряда, встроенный заряд, инверсия.

DOI: 10.15372/AUT20190506

**Введение.** Варизонные слои  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  (кадмий—ртуть—теллур (КРТ)) широко используются для пассивации поверхности плёнок этого материала в фотоприёмниках с целью подавления поверхностной рекомбинации фотогенерированных носителей заряда [1]. Однако при наличии в изолирующем диэлектрике (Д) встроенного заряда присутствие на поверхности абсорбера варизонного пассивирующего КРТ-слоя оказывает влияние на электрическое состояние приповерхностной области полупроводника и, в частности, на появление в системе инверсии. Выяснение деталей этого влияния является задачей, актуальной с точки зрения обеспечения нормальной работы фотодиодных матриц фотоприёмных устройств (ФПУ). Действительно, инверсия приводит к возникновению закорачивающих каналов  $n$ -типа проводимости между  $n$ -областями диодов (здесь и далее обсуждаются матричные ФПУ с архитектурой типа  $n$ -на- $p$ ). Очевидно, что появление таких каналов должно приводить к катастрофическому нарушению работы матрицы.

Исследованию областей пространственного заряда (ОПЗ) в варизонных слоях материала КРТ, а также изучению влияния варизонности на формирование инверсии в КРТ-плёнках, на эффективность работы фотодиодов и на электрические свойства структур на основе КРТ было посвящено значительное количество работ (см., например, публикации [2–10] и цитируемую в них литературу). Однако и в расчётных, и в экспериментальных таких работах в основном анализировался случай плавного спадания стехиометрического коэффициента  $x$  в объём плёнки. Такие исследования не позволяют получить ясное представление о факторах и зависимостях, определяющих влияние параметров варизонного слоя на величину инверсионного поверхностного потенциала (ПП) полупроводника. Помимо этого оказывается затруднённой оптимизация дизайна структур для получения систем с лучшими характеристиками.

Простым случаем, допускающим гораздо более прозрачный анализ, является модельный случай распределения состава  $x$  в форме ступеньки. В этом случае уже качественное

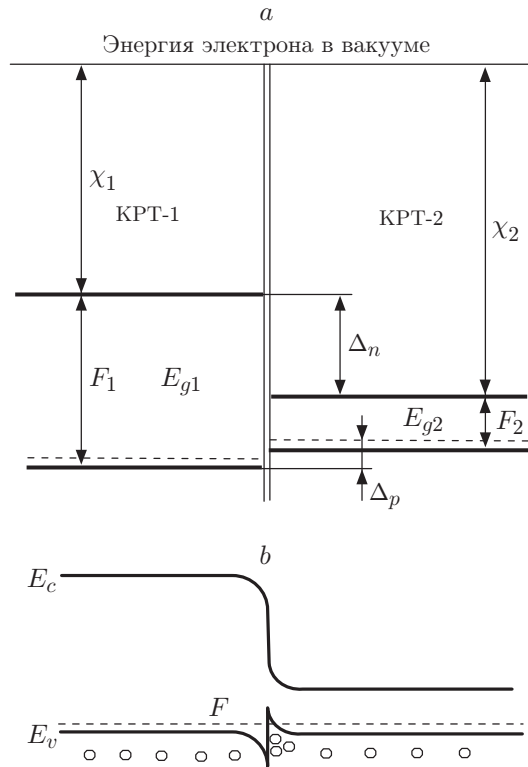


Рис. 1. Зонная диаграмма: неконтактирующих (а) и контактирующих КРТ-1 и КРТ-2 (b)

рассмотрение задачи позволяет сделать некоторые полезные выводы об условиях появления в системе инверсии. Кроме этого, оказывается возможным сделать первые шаги в направлении оптимизации дизайна структуры в целях противодействия формированию в системе инверсии при сохранении пассивационных свойств широкозонного поверхностного слоя.

В данной работе в качестве примера анализировалось появление инверсии в КРТ-структуре, состоящей из широкозонного поверхностного слоя материала КРТ-1 с пространственно-однородным составом  $x_1 = 0,45$ , выращенного на плёнке узкозонного абсорбера (КРТ-2) с однородным составом  $x_2 = 0,22$ . Обе части структуры предполагались однородно легированными мелкими однозарядными акцепторами до одного и того же уровня легирования  $N_1 = N_2 \equiv N_a = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Таким образом, для простоты не учитывалась фактическая электронная структура реальных легирующих акцепторов — вакансий ртути [11]. Равным образом рассматривался простой случай полупроводника с параболическими зонами (ср. с [2]).

**Влияние величин разрывов краёв зон на появление в структуре инверсии: качественный анализ.** Зонная диаграмма рассматриваемой структуры в ситуации плоских зон и при отсутствии перетекания НЗ на контактной границе КРТ-1 и КРТ-2 приведена на рис. 1, а. Видно, что различие величин электронного сродства ( $\chi_1 = 3,905 \text{ эВ}$ ,  $\chi_2 = 4,204 \text{ эВ}$ ) и ширины запрещённой зоны ( $E_{g1} = 0,482 \text{ эВ}$ ,  $E_{g2} = 0,115 \text{ эВ}$ ) материалов КРТ-1 и КРТ-2 [12] приводит к появлению разрывов края зоны проводимости и валентной зоны на контактной границе величиной  $\Delta_n = \chi_2 - \chi_1 = 0,299 \text{ эВ}$  и  $\Delta_p = (\chi_1 + E_{g1}) - (\chi_2 + E_{g2}) = 0,06865 \text{ эВ}$  соответственно. В однородно легированной структуре энергетические положения уровней Ферми в неконтактирующих КРТ-1 и КРТ-2, очевидно, различаются. При контактировании КРТ-1 и КРТ-2 в условиях квазинейтрального

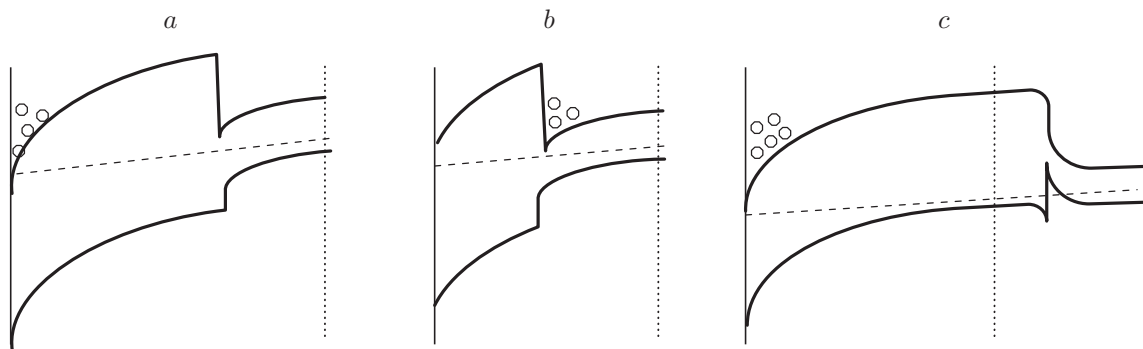


Рис. 2. Примерный ход краёв зон в структурах со ступенькой состава, находящейся: внутри (*a* и *b*) и вне (*c*) ОПЗ-1. Вертикальной пунктирной линией показан правый край индуцированной зарядом диэлектрика ОПЗ

объёма (КО) при отсутствии заряда в диэлектрике и на границе Д/КРТ-1 выравнивание уровней Ферми в двух частях структуры осуществляется в основном благодаря перетеканию дырок из КРТ-1 в КРТ-2 с образованием на границе двойного заряженного слоя, заряд которого слева от границы образован «обнажившимися» ионными остовами, а справа — избыточной (над акцепторным фоном) концентрацией дырок (рис. 1, *b*).

На рис. 2, *a, b* показан примерный ход краёв зон  $E_c$  и  $E_v$  в структуре с положительно заряженным диэлектриком в ситуации, когда скачок состава КРТ-1/КРТ-2 на момент появления в системе инверсии находится внутри области пространственного заряда ОПЗ-1, индуцированной зарядом в диэлектрике  $Q_i$ . В зависимости от толщины слоя КРТ-1 в этом случае возможны две ситуации: с увеличением ПП  $\varphi_s$  в сторону инверсии таковая впервые возникает либо на границе Д/КРТ-1, либо на контактной границе КРТ-1/КРТ-2 (относительно толстые и относительно тонкие слои КРТ-1 на рис. 2, *a* и *b* соответственно). Поверхность КРТ-2 при этом находится в обеднении (*a*) или в инверсии (*b*).

При бóльших толщинах КРТ-1, когда контактная граница КРТ-1/КРТ-2 покидает ОПЗ-1, из этой области начинает выделяться ОПЗ переходной области этой границы (ОПЗ-2), и далее ОПЗ-1 и ОПЗ-2 разделяются (рис. 2, *c*). После разделения поле двойного заряженного слоя ОПЗ-2, образующегося из-за перетекания дырок из КРТ-1 в КРТ-2, приводит к выравниванию уровня Ферми в двух частях структуры (см. рис. 2, *c*). Это поле элиминирует перепад встроенного потенциала, суммарный же заряд ОПЗ-2 при этом оказывается равным нулю.

Теперь возможно проанализировать, каким образом величины разрывов зон  $\Delta_n$  и  $\Delta_p$  сказываются на величине инверсионного ПП  $\varphi_{s\,inv}$  структуры. Полагаем, что величина ПП для формирования инверсии  $\varphi_{s\,inv}$  определяется при увеличении  $\varphi_s$  от нулевого значения (плоские зоны) до появления в системе инверсии. Как упоминалось выше, здесь возможны два случая: когда контакт между КРТ-1 и КРТ-2 на момент формирования инверсии попадает в область обеднения ОПЗ-1 и когда этот контакт остаётся вне этой области. В обоих случаях зависимость  $\varphi_{s\,inv}$  от  $\Delta_n$  тривиальна: чем больше разрыв  $\Delta_n$ , тем сильнее надо «гнуть внешним полем» зоны для формирования инверсии. Что касается влияния величины  $\Delta_p$ , то здесь следует различать упомянутые выше два случая: когда контакт КРТ-1/КРТ-2 попадает в ОПЗ-1 и когда он не попадает в эту область. В первом случае, если контактная граница КРТ-1/КРТ-2 попадает в ОПЗ-1, двойной заряженный слой исчезает из области контакта с восстановлением разрыва края валентной зоны, обусловленного встроенным полем. При этом в ОПЗ-1 возникает дополнительный изгиб зон (вниз на рис. 2, *a*) на величину  $\Delta_p$ , способствующий формированию в системе инверсии (ибо край зоны проводимости при этом также смещается вниз на величину  $\Delta_p$ ). Когда граница

КРТ-1/КРТ-2 на момент формирования поверхностной инверсии находится вне области ОПЗ-1 (см. рис. 2, *c*), вышеупомянутого восстановления встроенного изгиба зон не происходит. Поэтому ясно, что величина  $\varphi_{s\ inv}$  для рассматриваемой структуры со ступенькой состава должна отличаться от потенциала инверсии узкозонного полупроводника (когда вся система образована узкозонным материалом КРТ-2) на величину  $\Delta_n - \Delta_p$  или  $\Delta_n$  (первый и второй случай соответственно).

**Численные расчёты.** Выявленные закономерности были подтверждены численными расчётами, основанными на решении нелинейного уравнения Пуассона для рассматриваемой системы при типичной рабочей температуре ФПУ  $T = 78$  К. Решались уравнение, имеющее вид

$$\frac{\partial^2 \varphi(x)}{\partial x^2} = -\frac{q}{\varepsilon_1 \varepsilon_0} \left[ p_0 \exp\left(\frac{-\varphi(x) - 0,06865}{kT}\right) - k^* n_{02} \left( \exp\left(\frac{\varphi(x) - 0,299}{kT}\right) - 1 \right) \right] \quad (1)$$

в области, занятой материалом КРТ-1, и уравнение

$$\frac{\partial^2 \varphi(x)}{\partial x^2} = -\frac{q}{\varepsilon_2 \varepsilon_0} \left[ p_0 \exp\left(-\frac{\varphi(x)}{kT}\right) - n_{02} \left( \exp\left(\frac{\varphi(x)}{kT}\right) - 1 \right) \right] \quad (2)$$

в области, занятой материалом КРТ-2. Здесь  $n_{02}$  — концентрация электронов в глубине слоя КРТ-2,  $k^* = 23,724$  — отношение плотностей состояний в зоне проводимости материалов КРТ-1 и КРТ-2 [12], остальные обозначения являются общепринятыми. При записи уравнений (1) и (2) было учтено, что согласно [12] плотность состояний в валентной зоне материала КРТ не зависит от его состава. Для сшивки полей на границе КРТ-1 и КРТ-2 использовалось условие непрерывности электрической индукции. Осуществлялась стрельба из точки с выбранным значением потенциала  $\varphi_s$  со значением поля  $E_s$  таким, чтобы найденный в результате решения уравнений (1) и (2) потенциал  $\varphi(x)$  в глубине плёнки КРТ-2 асимптотически стремился к нулю. Наибольшая неопределённость в параметрах задачи содержится в величине диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  материала КРТ и её зависимости от состава  $x$  (ср. данные из [2] и [12]). В представленной работе использовались данные [12], согласно которым было принято:  $\varepsilon(x = 0,45) = 9,84$ ,  $\varepsilon(x = 0,22) = 12,165$ .

Расчитанные зависимости заряда в ОПЗ  $Q_{SCR}$  от ПП  $\varphi_s$  для нескольких структур представлены на рис. 3. Здесь кривыми 1 и 2 показаны данные для однородного КРТ состава  $x = 0,22$  и  $x = 0,45$  соответственно; кривыми 3 и 4 — данные для КРТ с перепадом состава между указанными величинами, расположенным на глубинах  $2 \cdot 10^{-5}$  и  $3 \cdot 10^{-5}$  мкм (оба случая соответствуют ситуации с попаданием ступеньки состава внутрь ОПЗ-1). Видно, что результаты расчёта хорошо согласуются с выводами вышеприведённого качественного анализа. Именно, кривые 1 и 2 оказываются сдвинутыми относительно друг друга по шкале ПП на величину, равную разности ширин запрещённой зоны двух материалов КРТ, а кривые 3 и 4 — сдвинутыми относительно кривых 1 и 2 на величины, примерно равные  $\Delta_n - \Delta_p$  и  $\Delta_p$ .

**Оптимизационный анализ модели варизонной структуры со ступенчатым изменением состава: аналитическая модель.** Принятая модель варизонной структуры на основе материала КРТ допускает проведение оптимизационного анализа её дизайна, направленного на подавление условий формирования в структуре инверсии (т. е. на максимизацию концентрации заряженных центров  $N_{ss}$  в диэлектрике, при которой в системе начинает образовываться инверсия). Рассмотрим задачу выбора оптимальной толщины  $w$  слоя широкозонного КРТ-1 в данной структуре. Задача допускает приближённый аналитический анализ, основанный на том обстоятельстве, что фигурирующие в ней ОПЗ с хорошей точностью можно считать слоями Шоттки, лишь «в одной точке» которых (на

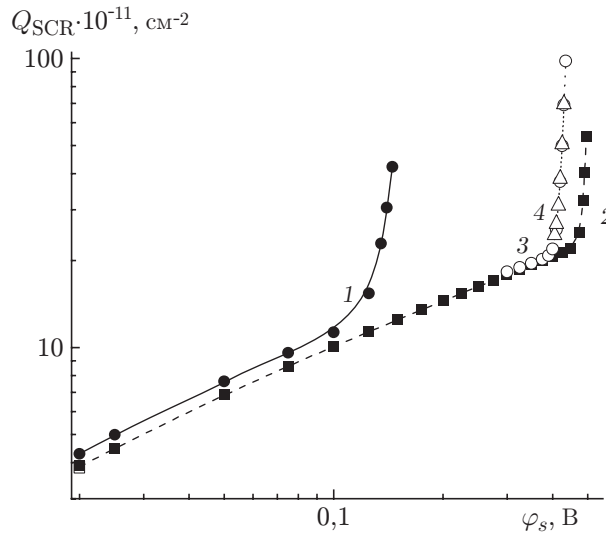


Рис. 3. Заряд ОПЗ  $Q_{SCR}$  как функция поверхностного потенциала  $\varphi_s$ : кривые 1 и 2 — однородный КРТ состава  $x = 0,22$  и  $0,45$  соответственно; кривые 3 и 4 — ступенька между указанными составами, расположенная на глубинах  $2 \cdot 10^{-5}$  и  $3 \cdot 10^{-5}$  см (внутри ОПЗ-1)

краю ОПЗ) при формировании инверсии концентрация электронов достигает концентрации акцепторов  $N_a$ .

Проанализируем зависимость  $N_{ss}(w)$  для рассматриваемой структуры. Задача заключается в определении поверхностного поля  $E_s$ , при котором в системе формируется инверсия; из найденного поля  $E_s$  далее можно вычислить предельно допустимое значение  $N_{ss}$ . При анализе хода потенциала  $\varphi(x)$  в случае формирования инверсии на границе Д/КРТ-1 разумно различать случаи, когда справа от ступеньки состава имеет место обогащение либо обеднение полупроводника дырками (поведение параболически зависящего от координаты  $x$  потенциала на границе КРТ-1/КРТ-2 в этих случаях иллюстрируется рис. 4,  $a$  и  $b$  соответственно).

Рассмотрим вначале первый случай, когда справа от ступеньки состава полупроводник обогащён дырками. Ясно, что при этом ступенька состава находится на краю ОПЗ-1, примыкающем к КО. Для этой ситуации характерно то, что потенциал на границе КРТ-1/КРТ-2 слабо отличается от потенциала в объёме КРТ-2 и является малым по

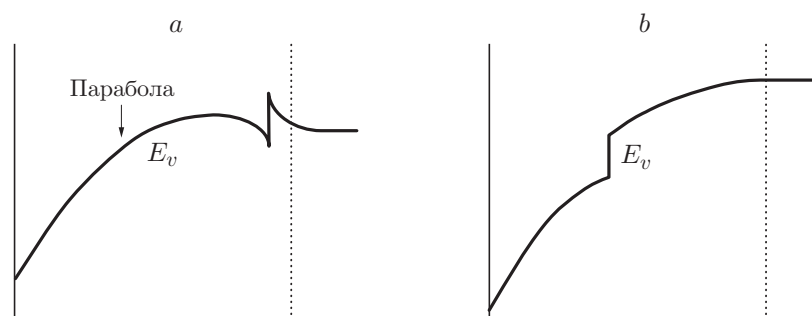
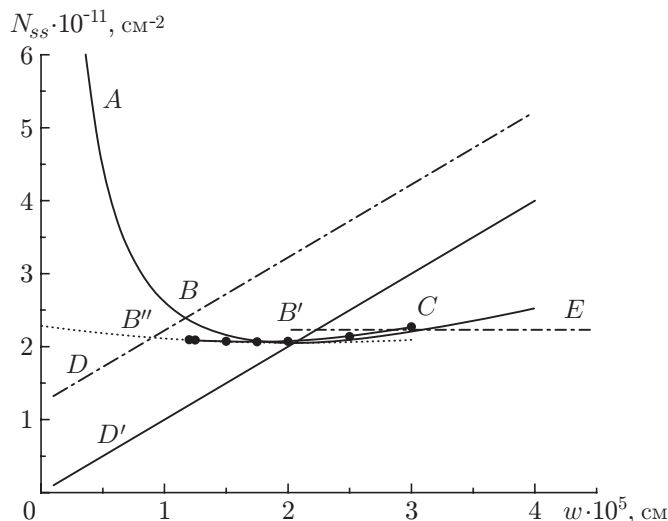


Рис. 4. Примерный ход края валентной зоны в ситуации, когда ступенька состава: находится на краю ОПЗ-1 ( $a$ ) и в её глубине ( $b$ ). Вертикальной пунктирной линией показан правый край индуцированной зарядом диэлектрика ОПЗ

Рис. 5. К анализу зависимости  $N_{ss}(w)$ 

сравнению с инверсионным потенциалом

$$\varphi_{s\,inv} = \delta\chi + kT \ln \left( \frac{N_a}{kn_{02}} \right).$$

В этих условиях для предельно допустимой плотности заряда в диэлектрике  $D$  нетрудно получить выражение

$$N_{ss} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_0}{q} E_s \approx \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_0}{q} \frac{\varphi_{s\,inv}}{w} + \frac{N_a w}{2}. \quad (3)$$

Зависимость (3) изображена на рис. 5 кривой  $ABB'C$  ( $B'$  — точка минимума этой кривой). Предпосылки, использованные при выводе формулы (3), выполняются на ветви  $B'C$  указанной кривой, когда ступенька состава располагается вблизи правой границы ОПЗ-1. Однако при движении ступеньки в сторону меньших толщин слоя КРТ-1 (в сторону ветви  $BB'$ , на которой, как будет объяснено далее, достигается случай обеднения полупроводника дырками справа от контакта КРТ-1/КРТ-2) выражение (3) больше не будет справедливым, так как потенциал на контакте в этом случае уже не является малым по сравнению с  $\varphi_{s\,inv}$ . В этой области (при не слишком малых  $w$ , см. далее) полученную зависимость (3) можно рассматривать как аппроксимацию первого порядка точного решения уравнений (1) и (2). В этом можно убедиться, рассматривая результаты численного решения уравнений (1) и (2) в сопоставлении с ветвью  $BB'$  кривой  $ABB'C$  (несколько соответствующих точек представлены на рис. 5 чёрными кружками). Заметим, что в духе изложенной выше аналитической модели для хода зависимости  $N_{ss}(w)$  слева от точки  $B'$  можно получить и более точное аппроксимирующее выражение

$$N_{ss} = N_a w \left[ \left( 1 - \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right) + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \sqrt{\left( 1 - \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right) + 2 \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_0}{q N_a w^2} \varphi_{s\,inv}} \right], \quad (4)$$

представленное на рис. 5 линией  $B'B''$ .

Как упоминалось выше, формулы (3) и (4) не отражают действительного хода зависимости  $N_{ss}(w)$  в области малых толщин  $w$ , при которых инверсия в системе начинает формироваться на границе КРТ-1/КРТ-2, а также в области больших толщин  $w$ , когда

области ОПЗ-1 и ОПЗ-2 оказываются разделёнными слоем квазинейтрального объёма полупроводника, а вся приповерхностная ОПЗ-1 лежит в широкозонном слое КРТ-1. Поэтому при анализе электрического состояния системы в области малых  $w$  следует полагать, что инверсия в ней впервые появляется на границе КРТ-1 и КРТ-2, а ОПЗ справа от границы КРТ-1/КРТ-2 представляет собой слой обеднения Шоттки. Тогда для  $N_{ss}$  можно получить зависимость

$$N_{ss} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_0}{q} E_s \approx \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_0}{q} \sqrt{\frac{2q N_a \varphi_B}{\varepsilon_2 \varepsilon_0}} + N_a w,$$

представленную на рис. 5 прямой  $DB$ .

Наконец, в области больших  $w$  вся приповерхностная ОПЗ лежит в материале КРТ-1, и поэтому для этой области зависимость  $N_{ss}(w)$  представляется горизонтальной линией

$$N_{ss} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_0}{q} \sqrt{\frac{2q N_a \varphi_B}{\varepsilon_1 \varepsilon_0}}$$

(отрезок  $CE$  на рис. 5).

Таким образом, окончательно искомая зависимость  $N_{ss}(w)$  изображается на рис. 5 линией  $DBB'CE$  (точнее,  $DB''B'CE$ ).

Заметим, что линия  $D'B'$ , проходящая через начало координат и параллельная линии  $DB$  (уравнение этой линии —  $N_{ss} = N_a w$ ), пересекает кривую  $BB'C$  в точке минимума; в этом нетрудно убедиться посредством исследования минимума зависимости (3). Поэтому в точке  $B'$  кривой  $BB'C$  полупроводник КРТ-2 справа от ступеньки состава находится в состоянии плоских зон, а слева и справа от точки  $B'$  — в состоянии обеднения и обогащения дырками.

Из рис. 5 следует, что изменение толщины  $w$  широкозонного слоя КРТ-1 не позволяет получить особенно значительного выигрыша в предельно допустимой величине  $N_{ss}$ .

**Рассмотрение других параметров задачи (рабочей температуры ФПУ и уровня легирования системы) как возможного инструмента решения оптимизационной задачи.** В качестве средства оптимизации варизонного дизайна структуры можно аналогично рассмотреть изменение и других входящих в задачу параметров (рабочей температуры ФПУ и уровня легирования системы  $N_a$ ). Опуская детали, изложим окончательный результат этого анализа. Из указанных параметров в рассмотренной задаче сколько-нибудь эффективным средством управления величиной  $N_{ss}$  оказалось варьирование концентрации  $N_a$ : было обнаружено, что при увеличении  $N_a$  в 2 раза, до  $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , плотность предельно допустимого заряда в диэлектрике возрастает примерно в 1,5 раза. В то же время было найдено, что при увеличении температуры до 150 К предельно допустимая величина  $N_{ss}$  даже несколько уменьшается (на 2–3 %).

**Заключение.** В данной работе изучалось влияние величины разрывов зон  $\Delta_n$  и  $\Delta_p$  материала КРТ на величину инверсионного поверхностного потенциала в двуслойной КРТ-структуре  $p$ -типа проводимости с однородным легированием и ступенчатым перепадом состава. Получено, что в ситуации, когда перепад состава попадает в приповерхностную ОПЗ, индуцированную встроенным зарядом изолирующего диэлектрика, увеличение величины  $\Delta_n$  способствует росту величины  $\varphi_{sinv}$ , а увеличение  $\Delta_p$  — её уменьшению. Если же область перепада состава остаётся вне приповерхностной ОПЗ, то тогда влияние величины  $\Delta_p$  исчезает. Также изучено влияние других параметров системы (толщины широкозонного КРТ слоя, температуры, уровня легирования системы  $N_a$ ) на формирование в ней инверсии. Полученные результаты могут быть полезными при выборе оптимальных параметров варизонных слоёв в фоточувствительных плёнках КРТ-фотоприёмников.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фотоприёмные** устройства на основе эпитаксиальной системы кадмий—ртуть—теллур /Отв. ред. А. Л. Асеев. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 258 с.
2. **Предеин А. В., Васильев В. В.** Особенности изгиба зон на поверхности варизонного  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  // Прикладная физика. 2011. № 35. С. 41–47.
3. **Voitsekhovskii A. V., Grigor'ev D. V., Korotaev A. G., Kokhanenko A. P.** Specific features of determining the electrophysical parameters of variband CMT structures grown by molecular-beam epitaxy // Russian Phys. Journ. 2004. **47**, N 7. P. 764–772.
4. **Васильев В. В., Есаев Д. Г., Кравченко А. Ф. и др.** Исследование влияния варизонности эпитаксиальных слоев на эффективность работы фотодиодов на основе твердых растворов  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  // Физ. и техн. полупроводников. 2000. **34**, вып. 7. С. 877–880.
5. **Wenus J., Rutkowski J., Rogalski A.** Two-dimensional analysis of double-layer heterojunction  $\text{HgCdTe}$  photodiodes // IEEE Trans. Electron Devices. 2001. **48**, N 7. P. 1326–1332.
6. **Ashby M. K., Gordon N. T., Elliott T. et al.** Novel  $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$  device structure for higher operating temperature detectors // Journ. Electron. Mater. 2003. **32**, N 7. P. 667–671.
7. **Voitsekhovskii A. V., Nesselov S. N., Dzyadukh S. M.** Influence of composition of the near-surface graded-gap layer on the admittance of metal-insulator-semiconductor structures based on graded-gap MBE  $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  in wide temperature range // Opto-Electron. Rev. 2014. **22**, N 4. P. 236–244.
8. **Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Дзядух С. М.** Влияние параметров приповерхностных варизонных слоёв на ёмкостные характеристики МДП-структур на основе гетероэпитаксиального  $\text{HgCdTe}$  МЛЭ // Успехи прикладной физики. 2013. **1**, № 5. С. 611–616.
9. **Voitsekhovskii A. V., Nesselov S. N., Dzyadukh S. M. et al.** Influence of near-surface graded-gap layers on electrical characteristics of MIS-structures based on MBE grown  $\text{HgCdTe}$  // Opto-Electron. Rev. 2010. **18**, N 3. P. 259–262.
10. **Voitsekhovskii A. V., Nesselov S. N., Dzyadukh S. M.** Electrophysical and photoelectrical properties of MIS structures based on MBE grown heteroepitaxial  $\text{HgCdTe}$  MIS structures with inhomogeneous composition distribution // Russian Microelectron. 2014. **43**, N 8. P. 552–558.
11. **Gemain F., Robin I.-C., De Vita M. et al.** Identification of the double acceptor levels of the mercury vacancies in  $\text{HgCdTe}$  // Appl. Phys. Lett. 2011. **98**. 131901.
12. **Itsuno A. M.** Bandgap-engineered  $\text{HgCdTe}$  Infrared Detector Structures for Reduced Cooling Requirements: Ph. D. Dissertation. University of Michigan, 2012. 175 p.

Поступила в редакцию 24.06.2019

После доработки 15.07.2019

Принята к публикации 07.08.2019