

Вольт-фарадные характеристики структур на основе $p\text{-Cd}_{0.27}\text{Hg}_{0.73}\text{Te}$ с широкозонным варизонным слоем на поверхности

© В.В. Васильев, Ю.П. Машуков

Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук,
630090 Новосибирск, Россия

(Получена 14 марта 2006 г. Принята к печати 24 марта 2006 г.)

Исследуются вольт-фарадные характеристики структуры In-SiO_2 -(варизонный слой $\text{Cd}_{0.71-0.27}\text{Hg}_{0.29-0.73}\text{Te}$)- $p\text{-Cd}_{0.27}\text{Hg}_{0.73}\text{Te-GaAs}$ при температуре 80 К и выше. Характеристики имеют гистерезис: при прямом ходе развертки (от обогащения к инверсии) характеристика близка к обычной высокочастотной, а при обратном ходе имеется протяженная полка, на которой емкость области пространственного заряда примерно в 2 раза больше. Для объяснения хода вольт-фарадной характеристики рассматривается эффект частичной экранировки варизонной части области пространственного заряда от электрического поля тестирующего сигнала, а также эффект формирования потенциальной ямы для электронов у поверхности за счет перезарядки донорных уровней.

PACS: 73.40.Cg, 73.40.Lq

1. Введение

Слои полупроводниковых твердых растворов кадмий-ртуть-теллур (КРТ), получаемые методом молекулярно-лучевой эпитаксии и имеющие на своих границах варизонные слои, в настоящее время являются одним из основных материалов для изготовления инфракрасных фотоприемников [1,2].

Вольт-фарадная характеристика (ВФХ) структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) может дать много полезной информации относительно характеристик полупроводникового образца вблизи его поверхности. При этом даже в случае однородного полупроводникового материала анализ ВФХ часто оказывается весьма сложным. В случае варизонного твердого раствора трудности анализа значительно увеличиваются. В настоящей работе исследуются особенности ВАХ образца КРТ p -типа проводимости в виде эпитаксиальной пленки на подложке GaAs, при этом на поверхности пленки имеется широкозонный варизонный слой. Наблюдающийся характерный гистерезис мы объясняем свойствами варизонного слоя.

2. Экспериментальные подробности

Для измерений использовались образцы, полученные методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Непосредственно после выращивания получались слои КРТ n -типа проводимости с концентрацией электронов $(1-10) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Проводимость p -типа с концентрацией дырок $(5-10) \cdot 10^{15}$ получалась в результате отжига образцов в парах ртути (см. [1], с. 173). Особенности ВФХ, рассматриваемые далее, мы наблюдали на образцах p -типа неоднократно. В данном случае использовался образец, имеющий следующие параметры: состав основного материала $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ соответствовал $x = 0.27$, толщина слоя 9 мкм, в варизонном слое содержание Cd линейно возрастало к поверхности

до значения $x = 0.71$ на толщине 0,5 мкм; холловская концентрация дырок — $9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, подвижность — $300 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Образец имел неправильную форму и площадь $\sim 1.5 \text{ см}^2$. Для получения МДП структур на образец наносился слой SiO_2 , получаемый плазмохимическим методом в реакторе с удаленной плазмой; полевые электроды размером $0.5 \times 0.5 \text{ мм}$ получались термическим испарением In через маску. Так как пленка КРТ располагалась на полуизолирующем GaAs, контакт к базе припаивался к слою КРТ и находился на периферии образца. Вследствие этого базовое сопротивление, включенное последовательно с комплексным сопротивлением МДП структуры, могло оказывать существенное влияние на измерения и его приходилось учитывать. Так как измерения ВФХ проводились с помощью измерителя импеданса VM-507, приходилось также следить за выполнением условия малости тестирующего сигнала. Тестирующая частота была выбрана равной 100 кГц. При более высоких частотах возрастало влияние продольного сопротивления, а при более низких частотах нарушалось условие малости тестирующего сигнала. Частота развертки составляла $5 \cdot 10^{-3} \text{ Гц}$; вид ВФХ оставался прежним, если частоту увеличить в 3 раза или уменьшить в 10 раз.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 показаны ВФХ $C(V)$, измеренные при температуре 80 К в темноте и при воздействии световым потоком от лампы накаливания с пониженным напряжением питания интенсивностью $\sim 1 \cdot 10^{16} \text{ фотон}/\text{см}^2 \cdot \text{с}$ с использованием техники, описанной нами в [3], а также ВФХ, измеренные при двух более высоких температурах. Так как полевой электрод был непрозрачным, фотоэффект определялся периферийными фотоэлектронами. При выбранной частоте тестирующего сигнала фаза комплексного сопротивления всего образца (включая

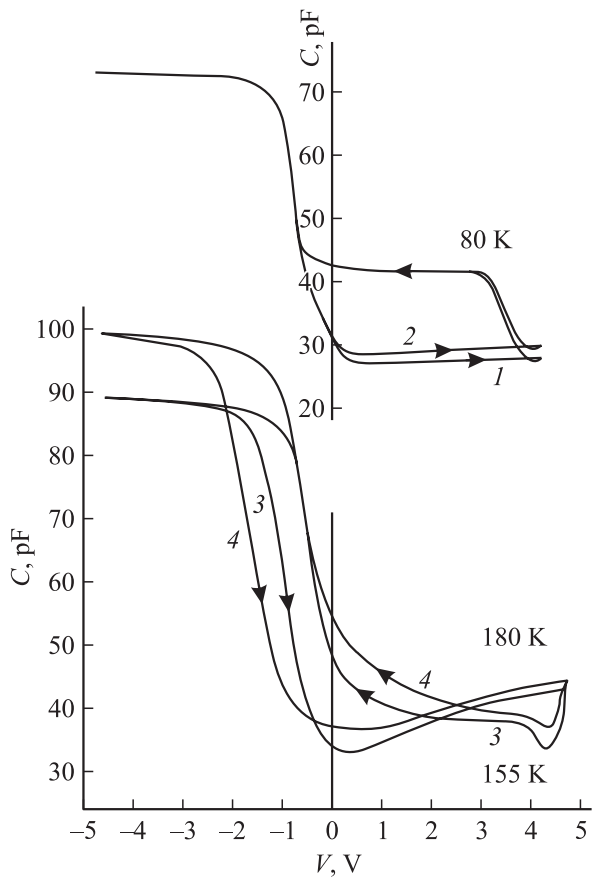


Рис. 1. Вольт-фарадные характеристики при трех температурах $T = 80$ (1, 2), 155 (3), 180 К (4). 1, 3, 4 — в темноте, 2 — при освещении.

базовое сопротивление) была везде не менее 75° ; вследствие этого реально приведенная на рис. 1 величина $(\omega Z)^{-1}$, где ω — циклическая частота тестирующего сигнала, Z — модуль импеданса, близка к емкости C МДП структуры.

Отметим основные особенности ВФХ при 80 К: 1) при прямом ходе развертки (от отрицательных напряжений к положительным) ВФХ имеет высокочастотный вид, однако при инверсии заметно некоторое возрастание емкости с увеличением напряжения; 2) в самом начале обратного хода развертки емкость немного убывает, прежде чем начать возрастать; 3) при прямом ходе фоточувствительность наблюдается, как и должно быть, при инверсии, однако при обратном ходе в области „полки“ она отсутствует; 4) отсутствует обычный гистерезис в области обеднения. При температурах 155 и 180 К: 1) резче проявляются особенности 1 и 2 из наблюдаемых при 80 К; 2) появляется обычный гистерезис; 3) емкость в области обогащения возрастает.

Наиболее заметной из всех перечисленных особенностей является наличие протяженной „полки“ при обратном ходе развертки. Необычным также является эффект первоначального уменьшения емкости после перехода от прямой к обратной развертке.

Отметим прежде всего, что гистерезис может проявляться в однородных полупроводниках при неравновесном обеднении [4]. При прямом ходе развертки емкость стабилизируется за счет полевой генерации неосновных носителей заряда, а при обратном ходе требуется снижение барьера для рекомбинации неосновных носителей, что достигается сжатием области пространственного заряда (ОПЗ) и увеличением вследствие этого емкости структуры. Однако в нашем случае отсутствует основной признак неравновесного обеднения — начальное плавное уменьшение емкости при прямом ходе развертки. Мы будем исходить из того, что неосновные носители приходят в ОПЗ из узкозонной области образца.

Рассмотрим зонную диаграмму варизонной структуры. На рис. 2, *a* кривые 1, 2 показывают начальное положение дна зоны проводимости (E_c) и потолка валентной зоны (E_v), которое характеризует состояние отдельных слоев структуры. В варизонном кристалле при такой зонной структуре и на электроны, и на дырки действует

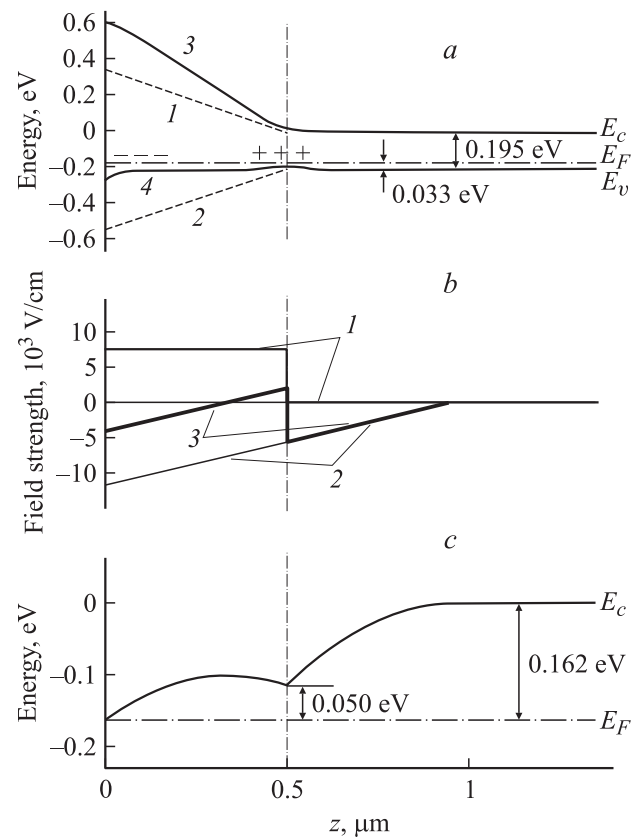


Рис. 2. *a* — зонная диаграмма варизонной МДП структуры при нулевом смещении: 1, 2 — начальное положение дна зоны проводимости и потолка валентной зоны соответственно; 3, 4 — то же в варизонном кристалле p -типа. *b* — диаграмма напряженности поля, действующего на электрон, находящийся в зоне проводимости, при положительном заряде на полевом электроде: 1 — напряженность встроенного поля, 2 — напряженность электрического поля зарядов, 3 — суммарная напряженность. *c* — диаграмма энергетического положения дна зоны проводимости для суммарной напряженности.

встроенное поле, стремящееся вытолкнуть их в узкозонную часть. Если полупроводник p -типа проводимости, то за счет встроенного поля на границе между варизонной и однородной частями образуется избыток дырок, создающий положительный заряд, а в варизонной части остается отрицательный заряд нескомпенсированных ионизованных акцепторов. Возникшее электростатическое поле сместит первоначальное расположение зон. Для его определения необходимо решить уравнение Пуассона для обобщенного потенциала, который является суммой электростатического потенциала, создаваемого зарядами, и потенциала, создаваемого встроенным полем (см., например, [5]). Мы далее проведем полуколичественные оценки.

Определим длину экранирования Дебая:

$$L_D = (2\epsilon \epsilon_0 kT / q^2 N_A)^{0.5} \quad (1)$$

(обозначения общепринятые: ϵ — диэлектрическая проницаемость, ϵ_0 — электрическая постоянная, q — заряд электрона, N_A — концентрация акцепторов, T — температура, k — постоянная Больцмана). Считая $N_A = 9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $\epsilon = 18$, имеем $L_D = 0.038 \text{ мкм}$, что в 13 раз меньше толщины варизонного слоя. При этом условия положение потолка валентной зоны в варизонной области будет мало отличаться от его положения в однородной части образца, и зонная диаграмма примет вид, показанный на рис. 2, *a* кривыми 3, 4. Оценим максимальную толщину обедненного слоя Δz , который возникнет в МДП структуре при инверсии. Будем считать, что толщина ОПЗ перестанет увеличиваться, когда на поверхности дно зоны проводимости опустится от первоначального значения до уровня Ферми E_F . Указанное изменение положения дна зоны проводимости определится электростатическим потенциалом слоя Δz :

$$\varphi = N_A q (\Delta z)^2 / 2\epsilon \epsilon_0. \quad (2)$$

Вычисления дают: $\Delta z = 0.30 \text{ мкм}$.

Полученная оценка не согласуется, однако, с экспериментальной величиной емкости. Беря из рис. 1, *a* минимальную емкость 27 пФ и емкость диэлектрика 74 пФ, получаем максимальное значение $\Delta z = 0.94 \text{ мкм}$. Будем в дальнейших оценках исходить из этого значения Δz , считая, что большее значение Δz обусловлено меньшей величиной концентрации неподвижных зарядов в ОПЗ.

Таким образом, в нашем случае область сильного обеднения заходит в однородную часть. Изобразим диаграмму сил, действующих на электрон (рис. 2, *b*): 1 — сила встроенного поля, она постоянна по величине вследствие линейного изменения состава по толщине и равна $7 \cdot 10^3 \text{ В/см}$; 2 — электростатическая сила; она, как это следует из уравнения Пуассона, изменяется линейно от координаты, так как мы по-прежнему предполагаем, что концентрация неподвижных зарядов в ОПЗ постоянна; 3 — суммарная сила. Потенциальная энергия электрона, т.е. энергия дна зоны проводимости, определяется интегралом от суммарной силы.

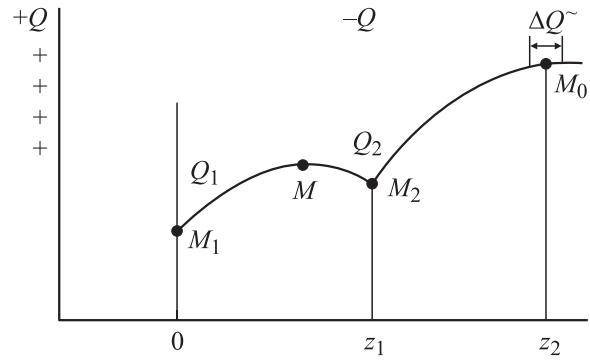


Рис. 3. Схематическое изображение обратно смещенной варизонной МДП структуры. $+Q$ — положительный заряд на полевом электроде; M_1, M_2 — энергетическое положение двух минимумов для диаграммы дна зоны проводимости, показанной на рис. 2, *c*; Q_1, Q_2 — соответствующие заряды электронов, ΔQ^{\sim} — заряд, затекающий в МДП структуру под действием тестирующего напряжения.

Используя максимальное значение электростатической силы как подгоночный параметр, добьемся, чтобы дно зоны проводимости на поверхности совпало с E_F . Тогда будем иметь диаграмму, показанную на рис. 2, *c*. Величина максимальной силы даст нам новую концентрацию акцепторов: $N_A = 1.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Таким образом, зонная диаграмма имеет два минимума, первый (M_1) — обычный инверсионный минимум на поверхности, а второй (M_2) — на границе варизонной области.

Проследим, как будет в этой ситуации изменяться заряд ОПЗ под действием тестирующего сигнала. Используем рис. 3, на котором диаграмма приведена в обобщенном виде. Известно, что для однородного КРТ с $x = 0.27$ на частоте 100 кГц ВФХ — заведомо высокочастотная. Вследствие этого заряд ΔQ^{\sim} , затекающий в МДП структуру и вытекающий из нее под действием тестирующего сигнала, будет располагаться только на границе обедненной области. Вместе с этим будет происходить перетекание электронов внутри ОПЗ из M_2 в M_1 и обратно, так как заряд ΔQ^{\sim} создает между слоями, в которых расположены минимумы, переменную разность потенциалов. В результате пространство между M_1 и M_2 окажется частично или полностью экранированным от действия поля тестирующего сигнала и емкость структуры увеличится. Сравнивая ситуацию с той, которая была бы в случае однородного по составу образца, можно сказать, что в однородном образце обмена электронами между инверсионным слоем и объемом не происходит, так как в объеме нет достаточного количества электронов, а генерация слаба; M_2 , появившийся за счет варизонного слоя, является резервуаром электронов, способствующим такому обмену.

Ясно, что интенсивность обмена между M_1 и M_2 определяется по крайней мере двумя факторами — количеством электронов в M_2 и высотой барьера M_2M_1 .

Высота барьера M_2M задает временные характеристики обмена. В нашем случае этот барьер достаточно низкий, и его влияние мы учитывать не будем.

Оценим величину эффекта экранирования. Будем считать, что заряд Q_2 в M_2 много меньше заряда Q_1 в M_1 , тогда справедливо выражение

$$Q_2 = KQ_1 \exp(-\Delta E/kT), \quad (3)$$

где $\Delta E = E_2 - E_1$ — разность энергий в точках M_2 и M_1 , K — некоторый коэффициент, определяемый количеством электронных состояний в минимумах M_1 и M_2 . Если выделить из ΔE переменную составляющую ΔE^{\sim} и считать ее малой по сравнению с kT , то для переменной составляющей заряда Q_2 будем иметь

$$Q_2^{\sim} = Q_2 \Delta E^{\sim} / kT. \quad (4)$$

Учтем далее, что

$$\Delta E^{\sim} = q\Delta\varphi^{\sim}, \quad (5)$$

где $\Delta\varphi^{\sim}$ — разность потенциалов, создаваемая зарядом ΔQ^{\sim} между точками M_1 и M_2 ,

$$\Delta\varphi^{\sim} = (\Delta Q^{\sim} - Q_2^{\sim})z_1/A\varepsilon\varepsilon_0, \quad (6)$$

где A — площадь структуры.

Так как при сильной инверсии большая часть заряда МДП структуры сосредоточена в инверсионной области, можно определить Q_1 через емкость диэлектрика C_D и напряжение на структуре V :

$$Q_1 = C_D V. \quad (7)$$

Комбинируя (3)–(7), получаем

$$Q_2^{\sim} / \Delta Q^{\sim} = B / (1 + B),$$

где

$$B = C_D V z_1 K q \exp(-\Delta E/kT) / AkT\varepsilon\varepsilon_0. \quad (8)$$

Отношение $Q_2^{\sim} / \Delta Q^{\sim}$ как раз и характеризует степень экранирования слоя между минимумами. Сделаем вычисления для нашего случая, положив $K = 1$, $V = 4$ В и взяв ΔE из рис. 2, с. Имеем: $Q_2^{\sim} / \Delta Q^{\sim} = 0.23$, т.е. получается заметная величина.

Небольшое происходящее по линейному закону возрастание инверсионной емкости можно объяснить эффектом экранирования. Факт линейной зависимости эффекта от напряжения находится в соответствии с выражением (8). Если взять экспериментальную величину приращения емкости при напряжении 4 В и объяснить ее уменьшением эффективной толщины слоя $0z_1$, мы получим для относительного уменьшения этой толщины значение 16%, что находится в соответствии с оценкой, сделанной выше.

На этом участке ВФХ наблюдается влияние освещения. Видно, что свет примерно в 3 раза увеличивает эффект экранирования. Из (4) видно, что эффект экранирования пропорционален числу электронов в M_2 ; следовательно, при освещении Q_2 увеличивается в 3 раза. В свою очередь Q_2 связан с Q_1 соотношением (3). Так как Q_1 определяется текущим значением напряжения на структуре, из (3) следует, что уменьшается величина ΔE . Это уменьшение ΔE можно объяснить еще и таким образом: поток электронов к поверхности определяется скоростью развертки; чтобы скомпенсировать дополнительный, связанный со светом, поток электронов, идущих из M_2 в M_1 , барьер для обратного потока M_1 в M_2 должен уменьшиться.

При повороте хода развертки сначала наблюдается небольшое уменьшение емкости. Этот эффект, можно приписать ослаблению эффекта экранирования за счет уменьшения заряда Q_2 . Затем емкость начинает возрастать, что обусловлено, по-видимому, сокращением толщины ОПЗ. Далее емкость выходит на „полку“. Наличие полки свидетельствует о том, что происходит некоторый процесс, при котором структура ОПЗ остается неизменной. Если считать, что инверсионные электроны уже ушли, это может быть процесс разрядки мощного моноуровня, локализованного на поверхности.

Однако нет достаточно весомых физических причин наличия такого моноуровня, поэтому мы предложим другое объяснение полки, которое нам кажется наиболее правдоподобным. Будем исходить из того, что в образце кроме мелкого акцепторного уровня имеются еще донорные уровни. При нулевом напряжении на МДП структуре, когда имеет место зонная диаграмма, показанная на рис. 2, а (кривые 3 и 4), донорные уровни свободны от электронов и суммарная плотность отрицательного неподвижного заряда близка по величине к минимально возможной. При обеднении вся зонная диаграмма будет понижаться, вследствие чего должна происходить перезарядка донорных уровней. Однако этот процесс в нашем случае оказывается сильно затрудненным из-за дефицита электронов. В широкозонной части генерация слаба, а диффузии электронов из объема препятствует высокий потенциальный барьер. Поэтому в процессе обеднения суммарная плотность неподвижных зарядов будет оставаться на низком уровне и граница обедненной области уйдет далеко. Только когда зонная диаграмма приблизится к той, что изображена на рис. 2, с, барьер для электронов, идущих из узкозонной области, исчезнет и произойдет формирование слоя свободных электронов, а также заполнение донорных уровней в ОПЗ и состояний на границе раздела с диэлектриком.

Перезарядка донорных уровней приведет к тому, что суммарная плотность неподвижного заряда в ОПЗ может оказаться существенно, может быть, в несколько раз выше первоначальной. Посмотрим, как это скажется на зонной диаграмме. Вкладом свободных электронов в формирование зонной диаграммы мы пренебрежем,

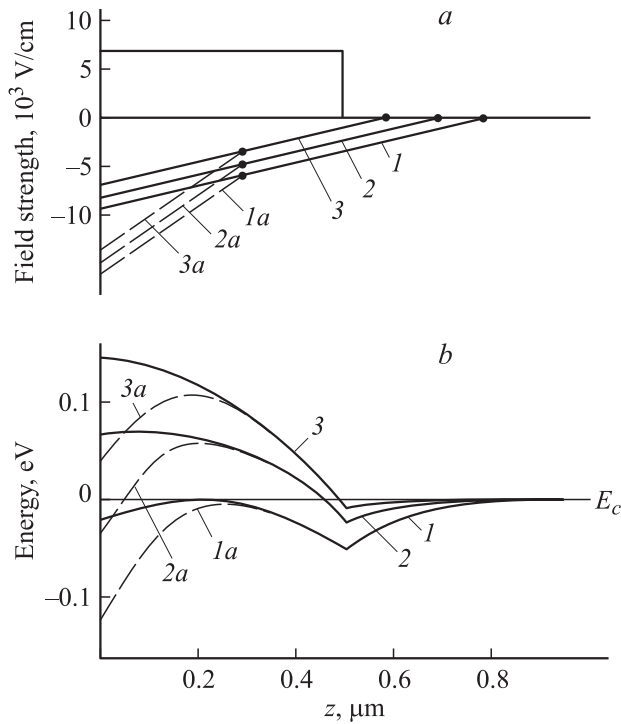


Рис. 4. Диаграмма силы и зонная диаграмма для ряда случаев (пояснения в тексте).

поверхностные заряды вообще не влияют на электрическое поле внутри ОПЗ. На рис. 4, эквивалентном рис. 2, *b, c*, рассмотрен ряд зависимостей, соответствующих либо однородному распределению неподвижного заряда (сплошные кривые 1–3), либо распределению, в котором имеется слой с вдвое большей концентрацией (штриховые кривые 1а–3а). Видно, что слой с большой концентрацией способствует появлению у поверхности потенциальной ямы, которая не исчезает при движении зонной диаграммы вверх.

Благодаря наличию этой ямы при обратном ходе развертки электроны, скопившиеся в M_1 , не смогут быстро уйти в объем; с другой стороны, дырки из объема не могут подойти к поверхности из-за высокого барьера. Поэтому необходимое уменьшение заряда ОПЗ, задаваемое разверткой, будет происходить за счет перемещения границы ОПЗ к поверхности. Постепенно барьер для дырок будет уменьшаться, а потенциальная яма для электронов становиться мельче. Наступит момент, когда ток разряда ОПЗ целиком будет обеспечиваться разрядом отрицательного заряда, скопившегося в потенциальной яме; тогда начнется полка, которая будет продолжаться до тех пор, пока в потенциальной яме не исчерпается весь запас электронов.

Протяженность полки $\Delta V = 0.35 \text{ В}$ позволяет определить величину заряда ΔQ , скопившегося в приповерхностной области. Используя выражение (7), в которое вместо V подставим ΔV , а также переходя к поверхностной плотности заряда, получаем:

$\Delta Q/Aq = 6.5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Определение эффективной толщины ОПЗ для полки исходя из величины емкости дает значение 0.4 мкм.

При повышенных температурах вид ВФХ становится более сложным. Резче проявляется эффект возрастания инверсионной емкости при прямом ходе развертки, а затем его убывание с началом обратного хода, что легко объяснить усилением эффекта экранирования за счет термического увеличения числа электронов в M_2 . Полка уже не выражена так резко. Это можно объяснить тем, что, во-первых, яма у поверхности не так прочно удерживает неравновесные электроны, и, во-вторых, момент отпирания барьера для потока дырок, идущих к поверхности, становится не столь критичным. Появляется обычный гистерезис в области обеднения, связанный скорее всего с захватом зарядов на границе раздела с диэлектриком или в самом диэлектрике. Еще один эффект — возрастание емкости диэлектрика с повышением температуры — хорошо известен для диэлектриков, выращенных при низкой температуре подложки (см. [1], с. 75). Фоточувствительность становится совсем незаметной.

4. Заключение

Таким образом, в данной работе обнаружен не совсем обычный вид ВФХ МДП структуры на основе варизонного образца CdHgTe p -типа проводимости. Подробно рассмотрены две особенности: 1) линейное возрастание инверсионной емкости при прямом ходе развертки и ее резкое уменьшение в начале обратного хода; 2) наличие протяженной полки при обратном ходе развертки. Первую особенность мы объясняем эффектом частичного экранирования варизонной части ОПЗ, который возникает благодаря тому, что инверсионные электроны оказываются сосредоточенными не только в узком слое у поверхности, как это имеет место в однородных полупроводниках, но имеется их заметная концентрация на протяжении всего варизонного слоя. Полку мы связываем с процессом нейтрализации отрицательного заряда, скопившегося у поверхности в потенциальной яме. Созданию этой потенциальной ямы способствует перезарядка донорных уровней.

Благодарим В.Н. Овсюка за ценные замечания.

Список литературы

- [1] В.Н. Овсюк, Г.Л. Курьшев, Ю.Г. Сидоров и др. *Матричные фотоприемные устройства ИК диапазона* (Новосибирск, Наука, 2001).
- [2] V.V. Vasilyev, D.G. Esaev, A.G. Klimenko et al. Proc. SPIE, **3061**, 956 (1997).
- [3] В.Н. Овсюк, В.В. Васильев, Ю.П. Машуков. ФТП, **34** (7), 822 (2000).
- [4] Т.Е. Руденко, А.А. Садовничий, А.Н. Назаров, В.С. Лысенко. *Поверхность. Физика, химия, механика*, № 6, 61 (1986).

[5] Т.Е. Ковалевская, В.Н. Овсяк. Автометрия, **40** (4), 57 (2004).

Редактор Л.В. Шаронова

Capacitance–voltage characteristics of the structures on $p\text{-Cd}_{0.27}\text{Hg}_{0.73}\text{Te}$ with the varizional layer on the surface

V.V. Vasilyev, Yu.P. Mashukov

Institute of Semiconductor Physics,
Siberian Division, Russian Academy of Sciences,
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract Investigated are capacitance–voltage characteristics (CVC) of the structures In–SiO₂–varizional layer $\text{Cd}_{0.71-0.27}\text{Hg}_{0.29-0.73}\text{Te}$ – $p\text{-Cd}_{0.27}\text{Hg}_{0.73}\text{Te}$ –GaAs at temperatures 80 K and higher. CVC is demonstrated a specific histeresis: at the straight direction (from minus to plus) CVC is close to usual high-frequence one, whereas at opposite direction it has a long plateau, on which a capacitance of the space charge region (SCR) is become approximately twice large. For explanation of the CVC motion is considered the effect of partial screening of the varizional part SCR from the testing signal electric field and also effect of the forming of the potential hole for the electrons, dislocated near the surface, as a resalt of the donor levels recharge.