

Электрические характеристики структуры CdTe–*n*-CdHgTe, полученной в едином процессе молекулярно-лучевой эпитаксии

© Ю.П. Машуков[¶], Н.Н. Михайлов, В.В. Васильев

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова
Сибирского отделения Российской академии наук,
630090 Новосибирск, Россия

(Получена 21 января 2010 г. Принята к печати 5 февраля 2010 г.)

Обнаружен необычный вид вольт-фарадных характеристик структуры CdTe–CdHgTe — они имели в области инверсии характерный „горб“, высота которого многократно увеличивалась при освещении. Дополнительные измерения с использованием светового зонда, измерения вольт-амперных характеристик, а также анализ зонной диаграммы структуры показали следующее: CdTe в отличие от CdHgTe имеет *p*-тип проводимости с концентрацией акцепторов $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; в CdHgTe на границе с CdTe имеется инверсионный слой дырок, который и является причиной появления „горба“; высота барьера для дырок на границе CdTe–Cd_{0.43}Hg_{0.57}Te оказалась равной 0.13 эВ.

1. Введение

Эпитаксиальные слои CdHgTe являются в настоящее время основным материалом для получения многоэлементных фотоприемных устройств средневолнового, 3–5 мкм, и длинноволнового, 8–14 мкм, диапазонов инфракрасной (ИК) области спектра [1]. Техника молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) позволяет легко вырастить слои CdHgTe с переменным по толщине составом, что дает возможность улучшения параметров фотоприемников. Например, варизонные слои с повышенным содержанием Cd, выращенные на границах с рабочим составом, отталкивают от границ неосновные носители заряда (либо электроны, либо дырки), что способствует уменьшению поверхностной рекомбинации фотоносителей, т. е. увеличению их времени жизни. Выращивание сверху рабочего состава CdHgTe слоя CdTe практикуется с целью пассивации поверхности фотоприемных устройств; при этом широкозонный CdTe заменяет собой пассивирующий диэлектрик [2–6]. Однако не всегда ясно, чем определяются диэлектрические свойства CdTe, то ли величиной его объемного сопротивления, то ли сказывается влияние запорных слоев на гетерограницах. Кроме того, неясно, нужно ли пассивировать сам CdTe (например, в [3] сверху CdTe наносился еще и ZnS).

2. Экспериментальные результаты

Настоящая работа посвящена исследованию электрических свойств гетероструктуры, полученной в едином процессе МЛЭ, содержащей слой однородного CdHgTe, затем слой варизонного CdHgTe, затем CdTe, на который напылялись термическим испарением через маску полевые электроды из In (рис. 1). Исследовались вольт-фарадные характеристики (ВФХ), вольт-амперные характеристики (ВАХ), проведен анализ зонной диаграммы структуры.

Многие подробности получения исследуемых нами структур описаны в [7], где исследовались структуры ZnTe–CdTe–CdHgTe.

Как и в наших других работах, ВФХ измерялись с помощью измерителя импеданса ВМ-507, а частота тестирующего сигнала выбиралась с таким расчетом, чтобы максимально удовлетворить двум противоречивым условиям, во-первых, малых искажений ВФХ за счет влияния базового сопротивления образца и, во-вторых, малой амплитуды тестирующего сигнала. Для измерения малых токов применялась специальная приставка на базе электрометрической лампы и с батарейным питанием. Для измерения величины тока каждый раз производилось включение и выключение напряжения. Так как подложкой структуры служил полуизолирующий GaAs, базовый контакт находился на планарной стороне структуры, на ее периферии. Он изготавливался следу-

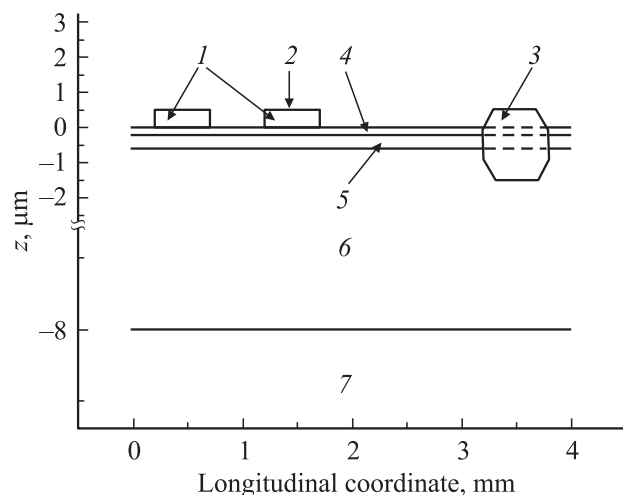


Рис. 1. Поперечное сечение структуры: 1 — полевые электроды; 2 — подвижный зонд (Ag-проволока); 3 — базовый контакт; 4 — CdTe; 5 — варизонный Cd_xHg_{1-x}Te, $x = 0.44–0.343$; 6 — однородный Cd_xHg_{1-x}Te, $x = 0.343$; 7 — GaAs-подложка. *z* — координата, перпендикулярная слоям структуры.

[¶] E-mail: dr_mashukov@mail.ru

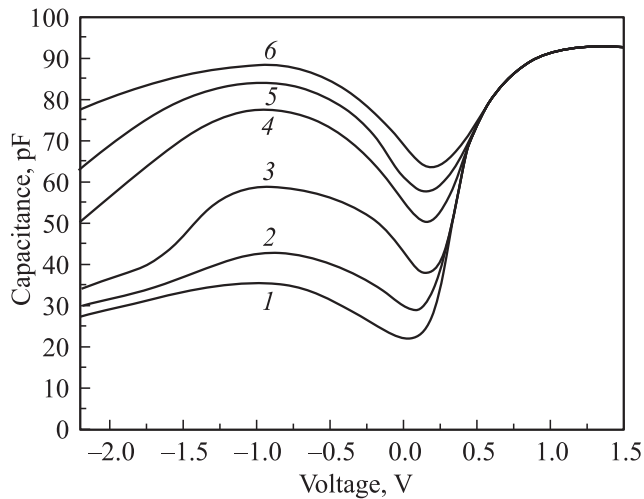


Рис. 2. Темновая (1) и световые (2–6) вольт-фарядные характеристики. Температура 80 К, частота тестирующего сигнала 50 кГц. Фронтальное освещение лампой накаливания номиналом 6 В, 0,34 А, расположенной в криостате на расстоянии 20 мм от образца; (2–6) — напряжение накала лампы 0,5–6 В соответственно.

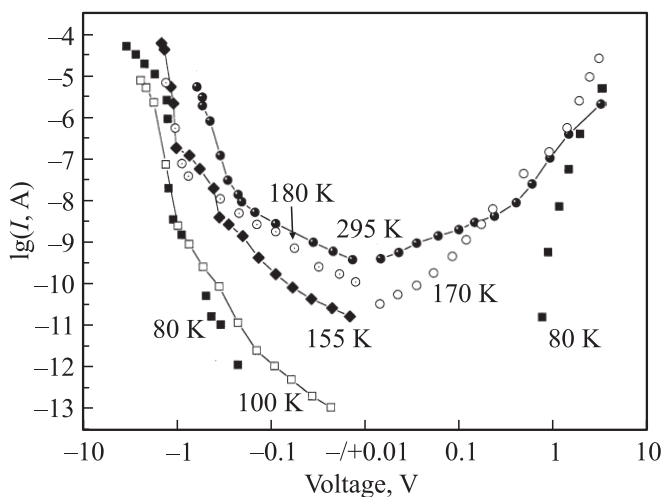


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики структуры при различных температурах.

ющим образом. Выбранное место проскабливалось на глубину в несколько мкм, затем к нему с помощью сплава на основе In, без применения флюса, припаивался предварительно луженый медный провод. Температура паяльника не превышала 200°С.

Измерения ВАХ при промежуточных между азотной и комнатной температурах проводились без стабилизации температуры. После добавления в криостат очередной порции азота выбирался временной интервал, когда температура столика для образца не изменялась более чем на несколько градусов. Холловские измерения при азотной температуре дали следующие значения концен-

трации электронов и их подвижности: $n = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $\mu = 11\,000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

На рис. 2 показаны ВФХ, которые имеют весьма необычный вид. С одной стороны, ясно, что образец обладает *n*-типом проводимости, однако в области инверсии наблюдается характерный „горб“, высота которого резко увеличивается при освещении. На рис. 3 приведены ВАХ, измеренные в широком диапазоне токов при различных температурах.

Измерения ВФХ были проведены также при освещении образца с использованием светового зонда размером 15 мкм (методика описана в [8]). Оказалось, что фотоемкость начинает существенно уменьшаться при удалении светового зонда от края полевого электрода только на расстояния 0,3–0,4 мм. Эта величина намного больше, чем характерная для CdHgTe объемная диффузионная длина неосновных носителей заряда. Для сравнения укажем, что в упомянутой работе [8] для объемного Cd_{0,28}Hg_{0,72}Te резкое уменьшение фотоемкости начинается уже на расстоянии ~ 15 мкм.

3. Обсуждение результатов

Обсудим вид ВФХ. Сильная фоточувствительность структуры металл–диэлектрик–полупроводник (МДП) с непрозрачным полевым электродом, а также большая площадь сбора фотоносителей свидетельствуют о том, что мы имеем в CdHgTe на его границе с CdTe мощный хорошо проводящий инверсионный слой, по которому фотоносители (дырки) могут попасть в МДП структуру с большого расстояния. Внутри МДП структуры проводимость инверсионного слоя отличается от таковой вне структуры и она зависит от напряжения на полевым электроде. Линии тестирующего тока, пересекающего МДП структуру, имеют возможность частично уйти в инверсионный слой вне МДП структуры и уже оттуда попасть в базу. Вследствие этого увеличивается эффективная площадь, а с ней и емкость структуры. Указанный эффект (эффект растекания) увеличивается, когда увеличивается проводимость инверсионного слоя внутри МДП структуры. Поэтому мы наблюдаем увеличение емкости в „горбе“, когда отрицательное напряжение возрастает. Дальнейшее уменьшение емкости связано с токами утечки — дырки уходят через CdTe в полевой электрод и проводимость инверсионного слоя опять уменьшается. Большая фоточувствительность объясняется резким увеличением при освещении числа дырок в инверсионном слое как вне структуры, так и внутри ее.

Остановимся на причинах появления сильного инверсионного слоя на границе CdTe–CdHgTe вне МДП структуры. Ясно, что этот слой появляется за счет отрицательного заряда, который может быть расположен внутри CdTe или на его границах. Структура энергетических зон такова, что и электронам, и дыркам выгоднее уйти из CdTe в более узкозонный CdHgTe. Мы

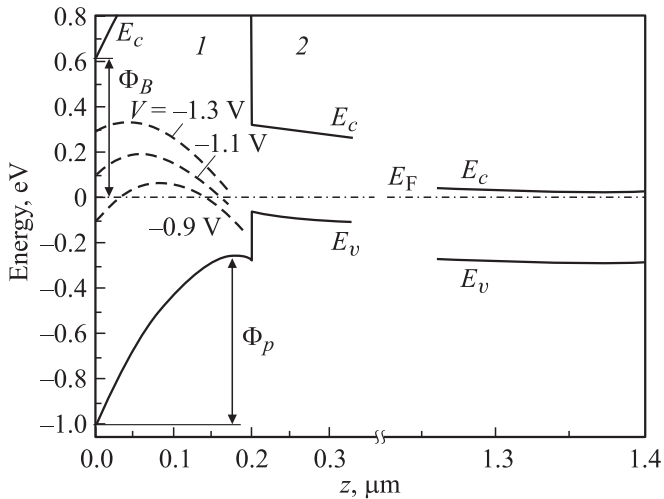


Рис. 4. Зонная диаграмма МДП структуры при напряжении на полевом электроде $V = 0$ (сплошные линии) и положении потолка валентной зоны при нескольких напряжениях (штриховые линии). 1 — область CdTe, 2 — область CdHgTe. Φ_B — барьер на границе In-CdTe, Φ_p — барьер для дырок внутри CdTe, E_F — уровень Ферми. Температура 80 К. E_c — зона проводимости, E_v — валентная зона.

в наших дальнейших рассуждениях будем исходить из предположения, что искомым отрицательный заряд — это заряд ионизованных акцепторов в CdTe, а дырки, все или частично, ушли в CdHgTe. Таким образом, CdTe в отличие от CdHgTe имеет p -тип проводимости.

Займемся построением зонной диаграммы внутри МДП структуры при внешнем напряжении $V = 0$ (рис. 4). Параметры CdTe и CdHgTe берем из [1]. Порядок вычислений опишем схематично. Известно [4], что увеличение ширины запрещенной зоны $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с ростом x сопровождается подъемом дна зоны проводимости и одновременным опусканием потолка валентной зоны. Опускание потолка валентной зоны происходит значительно медленнее, причем данные о величине этого смещения, приведенные в литературе, существенно отличаются друг от друга, вплоть до точки зрения, что это смещение вообще отсутствует. Мы будем считать, как и в [4], что опускание валентной зоны происходит на величину 0.35 эВ, когда мы переходим от HgTe к CdTe, причем изменение пропорционально x .

Обратимся к экспериментальным данным. Из рис. 2 видно, что минимум ВФХ приходится на $V = 0$. Известно, что минимум ВФХ наблюдается, когда концентрация неосновных носителей заряда на поверхности полупроводника достигает значения, равного $\sim 10\%$ от концентрации основных носителей в нейтральном объеме. Используя этот факт, определим энергию потолка валентной зоны на поверхности E_v^s , т.е. на границе CdTe-CdHgTe, по отношению к уровню Ферми E_F : $E_v^s = E_F - 0.071$ эВ. Учтем далее, что при наших составах (x) в структуре и при выбранной тестирующей

частоте не происходит обмена неосновными носителями заряда (дырками) между поверхностью и объемом, когда структура находится в состоянии инверсии. Поэтому величина емкости в минимуме ВФХ дает нам значение ширины области пространственного заряда Δz ; имеем: $\Delta z = 1.2$ мкм. Так как полученная величина E_v^s складывается из энергии, связанной с электростатическим потенциалом на поверхности, ϕ_s , и изменения положения потолка валентной зоны за счет варизонности (которое нам известно), вычисляем ϕ_s . Зная ϕ_s и Δz , получаем эффективную концентрацию неподвижного положительного заряда в области пространственного заряда (ОПЗ): $N_d = 3 \cdot 10^{14}$ см $^{-3}$.

Полученный результат не является неожиданным. Как показали наши многочисленные предыдущие исследования, для образцов n -CdHgTe с холловской концентрацией электронов $\sim 1 \cdot 10^{14}$ см $^{-3}$ концентрация заряда в ОПЗ, определенная из ВФХ, всегда выше этой величины, что естественно приписать наличию в запрещенной зоне CdHgTe глубоких донорных уровней. Теперь мы можем, используя классические соотношения для ОПЗ одномерного полупроводника и решая численно уравнение Пуассона для варизонной части структуры, получить зонную диаграмму в области CdHgTe.

Для продолжения зонной диаграммы в область CdTe необходимо дополнительно учесть следующие величины: работу выхода (A_0) для In, энергию электронного сродства (χ) для CdTe, а также величину барьера на границе In-CdTe (Φ_B). Берем: $A_0 = 4.4$ эВ, $\chi = 4.5$ эВ [9], $\Phi_B = 0.6$ эВ. Последняя величина выбрана нами в соответствии с известной концепцией, согласно которой для контакта металл-(полупроводник p -типа проводимости) Φ_B несколько меньше половины ширины запрещенной зоны полупроводника.

Будем исходить из предположения, что все дырки из CdTe ушли, а электронов еще нет. Тогда плотность заряда в CdTe окажется постоянной и решение уравнения Пуассона будет параболой. Для ее определения используем три уже известных параметра — значения энергий на двух границах и величину первой производной электростатического потенциала на границе CdTe-CdHgTe, которая не испытывает скачка на гетерогранице. Как видно, полученное решение (рис. 4) в самом деле соответствует сделанному ранее предположению, что в CdTe нет ни дырок, ни электронов, так как уровень Ферми находится далеко и от зоны проводимости, и от валентной зоны. Коэффициент при квадратичном члене параболической зависимости дает нам плотность заряда, или концентрацию акцепторов: $N_a = 1 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$.

На рис. 4 построены также зонные диаграммы для нескольких значений отрицательного напряжения на полевом электроде. По-прежнему считаем, что в CdTe нет ни электронов, ни дырок.

После определения величин N_d в CdHgTe и N_a в CdTe появляется возможность построить зонную диаграмму

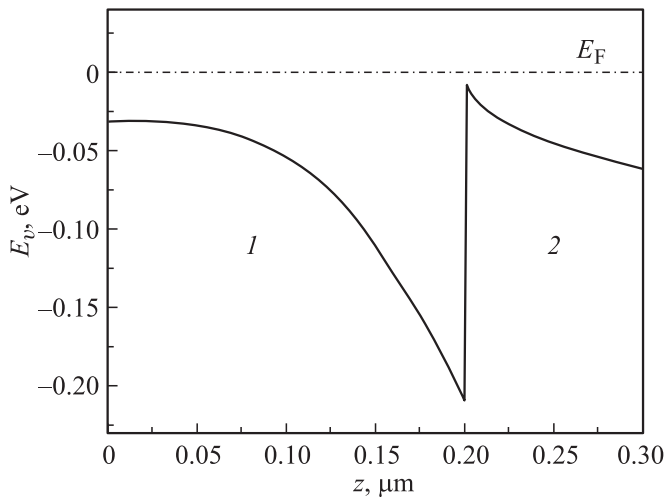


Рис. 5. Зонная диаграмма (энергия потолка валентной зоны E_v) в структуре вне полевого электрода. 1 — область CdTe, 2 — область CdHgTe, E_F — уровень Ферми.

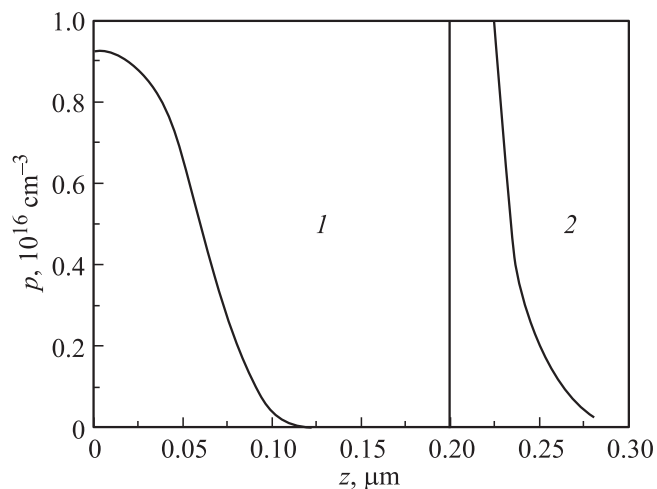


Рис. 6. Концентрация дырок p в структуре вне полевого электрода. 1 — область CdTe, 2 — область CdHgTe.

в области вне МДП структуры (рис. 5). В этом случае используем условие равенства нулю напряженности электрического поля на внешней границе CdTe, а также условие непрерывности электростатического потенциала и его первой производной на внутренней границе CdTe. На рис. 6 показано распределение концентрации дырок, которое следует из этой зонной диаграммы.

Рассматривая полученные зонные диаграммы, делаем ряд выводов. При напряжении на МДП структуре, равном нулю, инверсионный слой в CdHgTe имеется и внутри МДП структуры, и снаружи, причем во втором случае он сильнее. Вне МДП структуры в CdTe примерно четвертая часть его толщины имеет подвижные дырки в концентрации $\sim 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Судя по приведенной выше методике изготовления базового контакта, этот контакт, скорее всего, осуществляется одновременно к

CdHgTe и CdTe. Поэтому существуют два возможных канала электропроводности между базовым контактом и полевым электродом. Один из них проходит по базовому слою, а затем внутри МДП структуры пересекает CdTe; второй канал проходит по проводящему слою в CdTe. В этом втором канале имеется барьер между CdTe и периферией полевого электрода, так как полевой электрод при $V = 0$ заряжен положительно.

Обсудим вид ВАХ (рис. 3). Прежде всего отметим, что при малых напряжениях ВАХ имеют линейные участки, симметричные по отношению к знаку V , простирающиеся до напряжений $\sim 0.1 \text{ В}$. Такое поведение характерно для барьера, в котором изначально существуют противоположно направленные потоки носителей заряда, электрический ток которых уравнивается при $V = 0$. Можно предположить, что ВАХ при малых V определяется каналом электропроводности, проходящим по поверхности CdTe. Еще одна особенность ВАХ — наличие на отрицательной ветви участка особенно резкого увеличения тока при V , несколько превышающем 1 В . При этих же напряжениях мы наблюдаем спад темновой и световой емкости на ВФХ. ВАХ при различных температурах могут пересекаться друг с другом или иметь достаточно сложный вид (отрицательная ветвь при 155 К). Измерения ВАХ при промежуточных между азотной и комнатной температурах сопровождались значительными флуктуациями тока, хотя заметной релаксации тока не наблюдалось. Последние два факта, по-видимому, говорят о том, что при замораживании образца в нем происходят достаточно длительные процессы перераспределения электрических полей внутри структуры, что связано с перезарядкой глубоких центров, о возможности существования которых было сказано выше.

При освещении образца существенные изменения тока наблюдаются только для отрицательной ветви ВАХ. Ток при включении света мог увеличиться примерно на порядок. Ясно, что фотодырки, собирающиеся в инверсионном слое МДП структуры, увеличивают первоначальную концентрацию дырок в нем. Вследствие этого, во-первых, увеличивается поток дырок из инверсионного слоя в полевой электрод, а во-вторых, уменьшается положительный заряд ОПЗ, и это происходит за счет уменьшения его толщины, в результате чего емкость структуры увеличивается.

Из зонной диаграммы видно, что при переходе из CdHgTe в полевой электрод дыркам необходимо преодолеть два барьера, один на гетерогранице, а второй внутри CdTe. При повышении отрицательного напряжения примерно до 1.5 В барьер внутри CdTe постепенно уменьшается до нуля, а гетеробарьер не изменяется по высоте, однако становится уже, что увеличивает вероятность туннелирования дырок через него.

Оценим эту вероятность, используя известное выражение для вероятности туннелирования частицы через

треугольный барьер

$$P \propto \exp[8\pi(2m)^{0.5}\varphi^{1.5}/hqe],$$

где m — масса частицы, φ — высота барьера за вычетом кинетической энергии частицы, h — постоянная Планка, q — заряд электрона, E — напряженность электрического поля. Берем $m = m_p^* = 0.55m_0$ (m_p^* — эффективная масса дырки), $\varphi = 0.2$ эВ, $E = 7.5 \cdot 10^4$ В/см (для $V = -1.5$ В), получаем для показателя экспоненты значение -60 . Вероятность преодоления гетеробарьера Φ_g за счет тепловой энергии дырок $\propto \exp(-\Phi_g/kT) \approx \exp(-30)$, т.е. эта вероятность значительно больше, чем вероятность туннелирования. Определим ток через барьер, используя выражение

$$I = Aqp_s v_t / 6,$$

где A — площадь структуры, p_s — поверхностная концентрация дырок в инверсионном слое, v_t — их тепловая скорость. Взяв $p_s = 2 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$ и учтя множитель $\exp(-30)$, получаем $I = 1 \cdot 10^{-10}$ А.

Экспериментальная ВАХ показывает, что рассмотренный резкий рост тока в отрицательной ветви заканчивается при токах $3 \cdot 10^{-6}$ А. Будем считать, что рассмотренный резкий рост тока обусловлен постепенным исчезновением барьера внутри CdTe и что величина тока, когда этот барьер исчезает, определяется действием гетеробарьера (т.е. считаем, что в этой области напряжений другие механизмы протекания тока через структуру не оказывают на ВАХ существенного влияния). Тогда для получения приведенного выше экспериментального значения тока $3 \cdot 10^{-6}$ А нужно взять в теоретической оценке вместо $\exp(-30)$ множитель $\exp(-20)$, т.е. высоту гетеробарьера следует взять равной 0.13, а не 0.2 эВ, как мы предполагали вначале.

Таким образом, нам удалось создать непротиворечивую картину процессов, происходящих в исследуемой структуре. Построенная зонная диаграмма полностью подтвердила предварительные выводы, сделанные на основании экспериментальных фактов. Нетривиальным является вывод о том, что CdTe имеет p -тип проводимости с весьма высокой концентрацией акцепторов; сделать такой вывод на основании холловских измерений было бы весьма проблематично.

Ясно, что исследуемая структура не подходит для изготовления многоэлементных фотоприемных устройств, так как в CdHgTe на его границе с CdTe имеется инверсионный слой. Однако изучение данной структуры позволило сделать ряд полезных выводов.

4. Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

— Обнаружен необычный вид ВФХ с „горбом“ в области инверсии, высота которого резко увеличивается с

освещением. Увеличение емкости в „горбе“ при увеличении отрицательного напряжения смещения объясняется эффектом растекания, когда линии тестирующего тока выходят за границы площади МДП структуры благодаря наличию в CdHgTe инверсионного слоя дырок по всей площади образца, а уменьшение емкости объясняется утечкой дырок из инверсионного слоя в полевой электрод через CdTe.

— Из экспериментальных данных определена концентрация неподвижного положительного заряда в CdHgTe, которая оказалась в 3 раза выше, чем значение холловской концентрации электронов.

— Показано, что CdTe имеет p -тип проводимости с концентрацией акцепторов $1 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$, что является причиной появления инверсионного слоя в CdHgTe внутри и вне МДП структуры.

— Построенные зонные диаграммы внутри и вне МДП структуры подтверждают предварительные выводы относительно процессов, происходящих в структуре. Высота гетеробарьера для дырок на границе CdTe–CdHgTe получилась равной 0.13, а не 0.2 эВ, как это было принято нами первоначально.

Благодарим В.Н. Овсюка и А.В. Войцеховского за интерес к работе и полезные замечания.

Список литературы

- [1] А. Рогальский. *Инфракрасные детекторы* (Новосибирск, Наука, 2003).
- [2] G. Sarusi, G. Cinader, A. Zemel, G. Eger, Y. Shapira. *J. Appl. Phys.*, **71** (10), 5070 (1992).
- [3] G. Bahir, V. Ariel, V. Garber, D. Rosenfeld, A. Sher. *Appl. Phys. Lett.*, **65** (21), 2725 (1994).
- [4] N. Nemirovsky, N. Amir, G. Goren, G. Asa, N. Mainzer, E. Weiss. *J. Electron. Mater.*, **24** (9), 1161 (1995).
- [5] A. Jozwikowska, K. Jozwikowski, A. Antoszewski, C.A. Muska, T. Nguyen, R.H. Sewell, J.M. Dell, L. Faraone, Z. Orman. *J. Appl. Phys.*, **98**, 014504 (2005).
- [6] R. Pal, Amit Malik, Vany Srivastav, B.L. Sharma, V.R. Balakrishnan, V. Dhar, H.P. Vyas. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **53** (11), 2727 (2006).
- [7] А.А. Гузев, В.С. Варавин, С.А. Дворецкий, А.П. Ковчавцев, Г.Л. Курышев, И.И. Ли, З.В. Панова, Ю.Г. Сидоров, М.В. Якушев. *Прикл. физика*, № 2, 92 (2009).
- [8] В.В. Васильев, А.Ф. Кравченко, Ю.П. Машуков. *ФТП*, **36** (9), 1068 (2002).
- [9] J. Shilz, J. Thompson. *J. Mater. Sci.*, **28**, 6462 (1993).

Редактор Л.В. Шаронова

Electric characteristics of the CdTe–n-CdHgTe structure fabricated in a single molecular-beam epitaxy process

Yu.P. Mashukov, N.N. Mikhailov, V.V. Vasilyev

A.V. Rzhанov Institute of Semiconductor Physics,
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract It was revealed an unusual appearance of capacitance–voltage characteristics which had specific „hump“ in the inversion region. The height of this „hump“ increased multiple at lightening. Additional measurements with a light probe, also measurements of current–voltage characteristics and an analysis of the band structure diagram shown: CdTe, in contradiction to CdHgTe, had *p*-type conductivity with the acceptor concentration equal to $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; an inversion layer of holes occurred in CdHgTe at the interface with CdTe, which was a cause of the „hump“ arising; a height of the barrier for holes at the CdTe–Cd_{0.43}Hg_{0.57}Te interface was revealed equal to 0.13 eV.