

УДК 621.315.592

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

## Моделирование вольт-фарадных характеристик МДП-структур на основе МЛЭ HgCdTe при неоднородном распределении состава и легирующей примеси

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

*Проведено численное моделирование низкочастотных и высокочастотных вольт-фарадных характеристик (ВФХ) МДП-структур на основе n-Hg<sub>0,70</sub>Cd<sub>0,30</sub>Te с приповерхностным варизонным слоем с повышенным содержанием CdTe и неоднородным по толщине распределением концентрации донорной примеси в приповерхностном слое полупроводника. Показано, что неоднородное распределение концентрации электронов существенно влияет на вид ВФХ МДП-структуры на основе n-HgCdTe с приповерхностным варизонным слоем, что может искажать результаты определения спектра поверхностных состояний. Значение емкости в минимуме низкочастотной ВФХ определяется концентрацией электронов на границе области пространственного заряда с квазинейтральным объемом. Установлено, что при определении концентрационных профилей по наклону  $C^{-2}(V)$ -зависимости в режиме обеднения надо учитывать наличие приповерхностных варизонных слоев, которые влияют на граничные значения диапазона определения концентрации. Полученные результаты качественно согласуются с экспериментальными данными.*

*Ключевые слова:* HgCdTe, молекулярно-лучевая эпитаксия, МДП-структура, варизонный слой, концентрация легирующей примеси, вольт-фарадная характеристика, моделирование.

### Введение

Развитие метода молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) теллурида кадмия и ртути (Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te, HgCdTe) предоставило новые возможности выращивания гетероэпитаксиальных пленок с заданными распределениями состава и концентрации легирующей примеси [1]. Выращивание приповерхностных слоев с повышенным содержанием CdTe (составом  $x$ ) уменьшает влияние поверхностной рекомбинации на время жизни носителей заряда в объеме HgCdTe [2, 3], что используется для оптимизации характеристик инфракрасных детекторов.

Распространенным методом исследования свойств приповерхностного слоя полупроводника является измерение электрофизических свойств

МДП-структур, сформированных на основе этого полупроводника [4]. Определение большинства параметров МДП-структур проводится путем сравнения экспериментальной вольт-фарадной характеристики (ВФХ) с идеальной (расчетной) зависимостью емкости от напряжения. Для однородного полупроводника расчет идеальной зависимости возможен при помощи аналитических формул, но для МДП-структуры на основе варизонного HgCdTe необходимо численно решать уравнение Пуассона (например, методом стрельбы [5]).

Известно, что концентрация основных носителей заряда в приповерхностном слое HgCdTe, выращенного методом МЛЭ, может существенно отличаться от объемной концентрации основных носителей заряда [6, 7]. Расчет ВФХ МДП-структур на основе полупроводника с неоднородным распределением примеси проводился, например, в работах [8, 9].

В данной работе проводится численное моделирование вольт-фарадных характеристик на основе МЛЭ HgCdTe с варизонными слоями и неоднородным распределением легирующей примеси в приповерхностном слое полупроводника с целью выявления особенностей формирования ВФХ таких структур.

Войцеховский Александр Васильевич, зав. кафедрой.  
Несмелов Сергей Николаевич, с.н.с.  
Дзядх Станислав Михайлович, с.н.с.  
Национальный исследовательский Томский государственный университет.  
Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 36.  
Тел. (3822) 41-27-72. E-mail: vav43@mail.tsu.ru

Статья поступила в редакцию 14 июня 2018 г.

© Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Дзядх С. М., 2018

### Метод моделирования вольт-фарадных характеристик и параметры образцов

Для численного расчета идеальных ВФХ методом стрельбы решалось уравнение Пуассона, записанное в следующей форме [5, 9]:

$$\frac{d \varepsilon_0 \varepsilon_s(z) \frac{d\varphi}{dz}}{dz} = -q\rho \quad z, \varphi,$$

$$\rho \quad z, \varphi = n_0 \quad z \left( 1 - \exp\left(\frac{q\varphi}{kT}\right) \right) +$$

$$+ \frac{n_i^2 \quad z}{n_0 \quad z} \left( \exp\left(-\frac{q\varphi}{kT}\right) - 1 \right),$$

где  $\rho \quad z, \varphi$  – плотность индуцированного заряда в области пространственного заряда (ОПЗ),  $\varepsilon_s \quad z$  – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника,  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная (в системе СИ),  $q$  – заряд электрона,  $\varphi$  – потенциал,  $z$  – координата,  $n_0$  – концентрация электронов,  $n_i$  – собственная концентрация,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура. Граничные условия могут быть записаны в следующем виде [5]:

$$\varphi \quad 0 = \varphi_s,$$

$$\varphi \quad \infty = \frac{d\varphi}{dz} \Big|_{z \rightarrow \infty} = 0,$$

где  $\varphi_s$  – поверхностный потенциал. При расчетах для аппроксимации распределения содержания CdTe по координате  $z$  в приповерхностном слое использовалось следующее выражение:

$$x \quad z = x_0 + A_1 \text{Exp}\left(-\frac{z}{B_1}\right),$$

где  $x_0$  – состав в рабочем слое,  $A_1$  и  $B_1$  – коэффициенты, которые определяют распределение состава в варизонном слое.

Расчет выполнен для МДП-структуры на основе  $n$ -HgCdTe. Зависимость концентрации электронов от координаты описывалась выражением:

$$n_0 \quad z = n_{bulk} + n_s - n_{bulk} \times \left( \frac{z_1 - z}{z_1} \right), \quad z < z_1$$

$$n_0 = n_{bulk}, \quad z \geq z_1,$$

где  $n_{bulk}$  – концентрация донорной примеси в квазинейтральном объеме полупроводника (при расчете  $n_{bulk} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ),  $n_s$  – концентрация электронов

вблизи границы раздела (при расчете  $n_s = 8 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ),  $z_1$  – толщина слоя, в котором изменяется концентрация электронов (в случае полной ионизации донорной примеси).

На рис. 1 приведены примеры зависимостей состава и концентрации примеси от координаты. Параметр  $z_1$  характеризует толщину приповерхностного слоя, в котором концентрация электронов уменьшается по линейному закону относительно концентрации электронов на границе раздела ( $z = 0$ ).

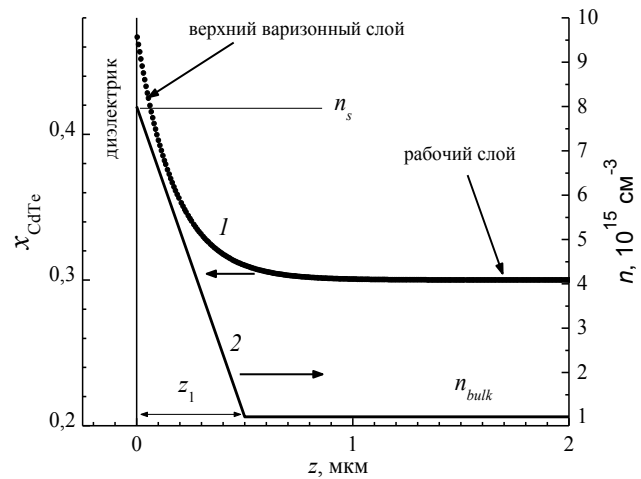


Рис. 1. Распределение состава  $x_{CdTe}$  (кр. 1) и концентрации электронов  $n$  (кр. 2) от координаты  $z$  для пленки МЛЭ  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  ( $A_1 = 0,17$ ,  $x_0 = 0,30$ ,  $B_1 = 0,177$  мкм;  $n_{bulk} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $n_s = 8 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $z_1 = 0,5$  мкм).

### Результаты моделирования и их обсуждение

На рис. 2 показаны идеальные низкочастотные (НЧ) ВФХ для МДП-структуры на основе варизонного  $n$ - $Hg_{0,70}Cd_{0,30}Te$  при различных значениях толщины слоя  $z_1$ , рассчитанные при температуре 77 К. Емкостная характеристика значительно изменяется при неоднородном распределении концентрации электронов по сравнению с аналогичной характеристикой для случая постоянной концентрации ( $z_1 = 0$ ). Из рис. 2 видно, что при увеличении значения толщины слоя линейного изменения концентрации ( $z_1$ ) наклон ВФХ в режиме обеднения становится более пологим, а минимум емкости наблюдается при больших отрицательных значениях. Также возрастает значение емкости в минимуме, причем наибольшие изменения происходят в диапазоне  $z_1$  от 0,3 до 0,5 мкм. Это связано, с тем, что значение емкости в минимуме ВФХ определяется концентрацией электронов на границе ОПЗ, что согласуется с выводами работы [8]. Отметим, что при 77 К и постоянной концентрации электронов  $10^{15}$  и  $8 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$  мак-

симальная ширина ОПЗ для однородного по составу  $n\text{-Hg}_{0,70}\text{Cd}_{0,30}\text{Te}$  составляет 0,572 и 0,217 мкм [4] соответственно. При медленном уменьшении концентрации электронов от границы раздела уменьшается максимальная ширина ОПЗ, поэтому при  $z_1 = 0,3$  мкм значение емкости в минимуме изменяется, поскольку ширина ОПЗ несколько меньше, чем  $z_1$ .

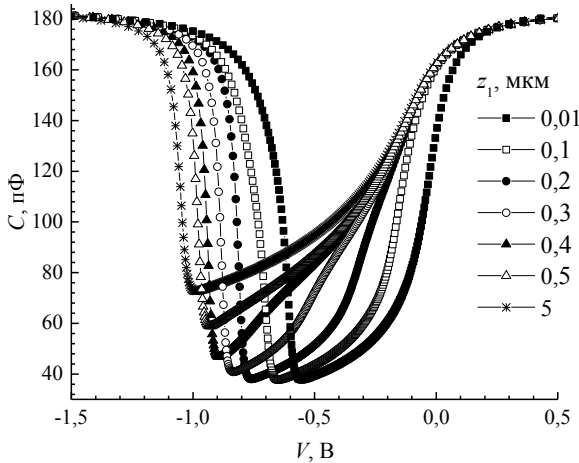


Рис. 2. Идеальные НЧ зависимости емкости  $C$  от напряжения  $V$  для МДП-структуры на основе варизонного  $n\text{-Hg}_{0,70}\text{Cd}_{0,30}\text{Te}$  при разных значениях  $z_1$ .

Рис. 3 показывает зависимость емкости полупроводника в минимуме НЧ ВФХ от значения  $z_1$ . На этой зависимости можно выделить три участка.

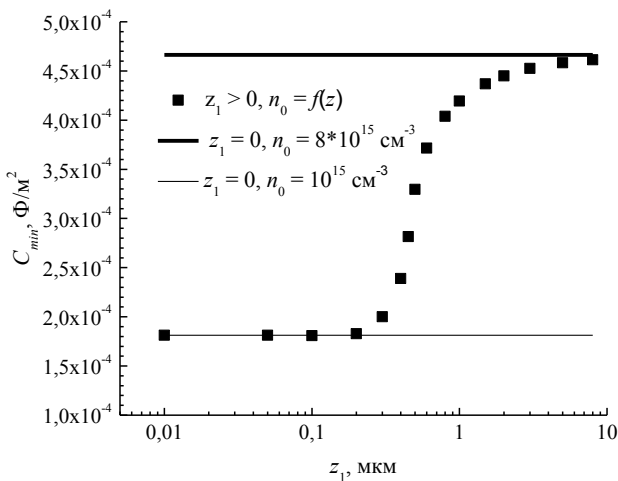


Рис. 3. Зависимость минимальной НЧ удельной емкости полупроводника  $C_{\min}$  от толщины слоя  $z_1$  для МДП-структуры на основе варизонного  $n\text{-Hg}_{0,70}\text{Cd}_{0,30}\text{Te}$ .

На первом участке ( $z_1$  в диапазоне 0–0,2 мкм) емкость в минимуме постоянна и минимальна, поскольку концентрация электронов на границе ОПЗ–квазинейтральный объем не изменяется и равна объемной концентрации ( $10^{15} \text{ см}^{-3}$ ). При

этом максимальная ширина ОПЗ превышает толщину слоя линейного изменения концентрации ( $z_1$ ). На втором участке ( $z_1$  от 0,2 до 1 мкм) происходит наиболее резкое увеличение минимальной емкости из-за возрастания концентрации электронов на границе ОПЗ–квазинейтральный объем (толщина  $z_1$  начинает превышать максимальную толщину ОПЗ). На третьем участке ( $z_1 > 1$  мкм) толщина слоя линейного изменения концентрации  $z_1$  значительно превышает максимальную ширину ОПЗ. При этом концентрация электронов на границе ОПЗ изменяется уже незначительно и значение емкости в минимуме асимптотически приближается к значению минимальной емкости для объемной концентрации  $8 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

На рис. 4 приведены результаты определения координатных зависимостей концентрации электронов из идеальных НЧ и высокочастотных (ВЧ) ВФХ МДП-структур на основе  $n\text{-HgCdTe}$  с постоянными концентрациями электронов (7 значений).

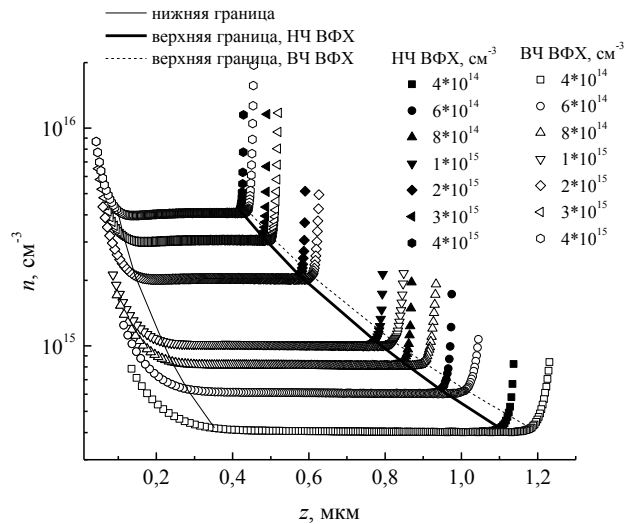


Рис. 4. Зависимости концентрации электронов  $n$  от координаты  $z$ , определенные из идеальных НЧ и ВЧ ВФХ МДП-структуры на основе варизонного  $n\text{-Hg}_{0,70}\text{Cd}_{0,30}\text{Te}$  с различной постоянной концентрацией электронов.

Профили распределения электронов по толщине определялись по наклону зависимости  $C^{-2}(V)$  в обеднении [10]. Резкое увеличение определяемой концентрации при малых и больших координатах связано с нарушением приближения обеднения, а выражения для нижней и верхней границ диапазона, в пределах которого ошибка нахождения концентрации не превышает 5 %, приведены, например, в работе [11]. Границы определения профиля концентрации зависят от наличия варизонного слоя с повышенным содержанием CdTe (рис. 5). Это связано с тем, что в структуре с варизонным слоем максимальная толщина ОПЗ превышает соответствующее значение для структуры без вари-

зонного слоя из-за большего поверхностного потенциала, при котором реализуется режим сильной инверсии (вблизи границы раздела при большом составе значительно снижается собственная концентрация). Для распространенного случая МДП-структуры на основе  $\text{Hg}_{0,70}\text{Cd}_{0,30}\text{Te}$  влияние наличия варизонного слоя (при  $A_1 = 0,23-0,27$ ) должно быть еще большим.

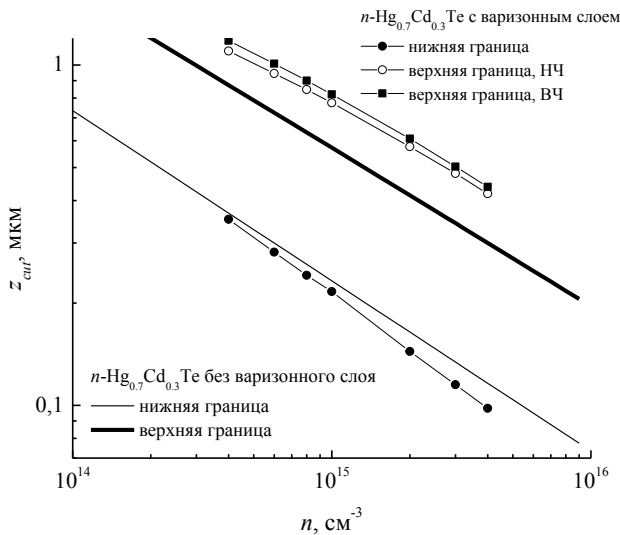


Рис. 5. Зависимости верхней и нижней границы определения концентрации электронов  $z_{\text{cut}}$  из ВФХ МДП-структур на основе  $n\text{-Hg}_{0,70}\text{Cd}_{0,30}\text{Te}$  с верхним варизонным слоем и без такого слоя от концентрации электронов  $n$ .

При произвольном распределении состава в приповерхностном слое  $\text{HgCdTe}$  получить аналитические выражения для границ диапазона определения концентрации  $C^{-2}(V)$ -методом невозможно. Можно приближенно определить границы путем численного моделирования ВФХ МДП-структур на основе  $\text{HgCdTe}$  с известными значениями параметров варизонного слоя при постоянной концентрации основных носителей заряда (и построить графики, аналогичные рис. 4 и 5). Отметим, что приближенно найти концентрацию основных носителей заряда, от которой зависит значение НЧ-емкости в минимуме экспериментальной ВФХ, можно по значению координаты, при которой происходит увеличение определяемой концентрации на 5%. Пока нерешенной проблемой при определении границ является случай неоднородного распределения концентрации основных носителей заряда в приповерхностном слое полупроводника.

### Экспериментальная проверка результатов моделирования

Проведена экспериментальная проверка полученных в результате моделирования результа-

тов. Гетероэпитаксиальные пленки выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на  $\text{Si}(013)$  подложках в Институте физики полупроводников имени А. В. Ржанова СО РАН. Параметры  $x_0$  и  $A_1$  верхних варизонных слоев для структур № 1 и 2 отличались незначительно, но параметр  $B_1$  для структур № 1 и 2 составлял 0,177 и 0,112 мкм соответственно. До нанесения диэлектриков при помощи метода Холла определялись интегральные концентрации электронов ( $n_{\text{холл}}$ ) в эпитаксиальных пленках. Сверху варизонного слоя для структуры № 1 методом плазменного атомно-слоевого нанесения формировался диэлектрик  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [12, 13]. Для структуры № 2 сверху варизонного слоя *in situ* в процессе эпитаксиального роста создавался слой  $\text{CdTe}$  толщиной 0,25 мкм, а затем наносилась пленка  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Концентрация электронов определялась также при помощи емкостных методов – из значения ВЧ-емкости в режиме сильной инверсии ( $n_C$ ) [14, 15]. Рассчитывались концентрационные профили электронов при помощи  $C^{-2}(V)$ -метода (рис. 6), из них определялись концентрации электронов вблизи верхней границы диапазона ( $n_1$ ). Также из профилей приближенно находилась координата, соответствующая верхней границе диапазона определения концентрации электронов ( $z_{\text{rp}}$ ). При помощи рис. 5 по значению этой координаты приближенно находилась соответствующая концентрация электронов ( $n_2$ ).

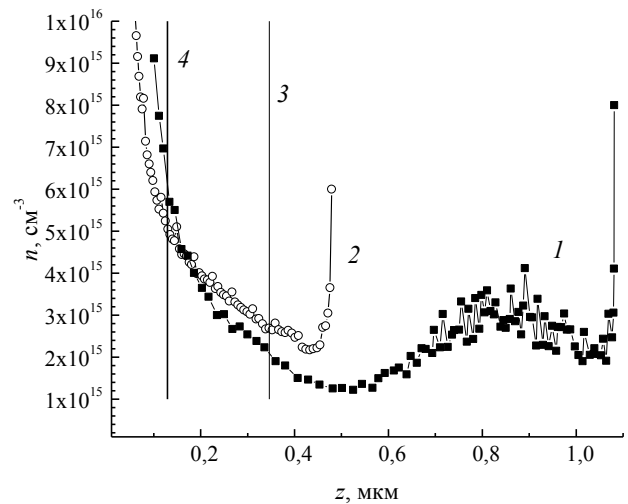


Рис. 6. Зависимости концентрации электронов  $n$  от координаты  $z$ , рассчитанные из экспериментальных ВФХ МДП-структур на основе  $n\text{-Hg}_{0,70}\text{Cd}_{0,30}\text{Te}$  с варизонными слоями (структура № 1 – кр. 1, структура № 2 – кр. 2). Вертикальными линиями показаны нижние границы для структуры № 1 (кр. 3) и 2 (кр. 4).

Значения концентраций, найденных разными методами, а также параметры верхних варизонных слоев показаны в таблице. Из приведен-

ных данных можно сделать вывод, что холловская концентрация электронов оказывается меньше концентраций, найденных при помощи различных емкостных методик. Этот эффект особо ярко выражен для МДП-структур на основе  $n\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x = 0,21\text{--}0,23$ ) с варизонным слоем [15], хотя проявляется также для МДП-структур на основе  $n\text{-Hg}_{0,70}\text{Cd}_{0,30}\text{Te}$ . Концентрация электронов, определенная по значению ВЧ-емкости в сильной инверсии ( $n_C = 4,5 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ), хорошо согласуется с

концентрацией, найденной по верхней границе диапазона ( $n_2 = 5,1 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ). Концентрация электронов, найденная из концентрационного профиля, имеет большие в 4 раза значения ( $n_1 = 1,9 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ). Это связано с высокой плотностью медленных поверхностных состояний, расположенных вблизи границы раздела  $\text{HgCdTe}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Эти состояния изменяют свое зарядовое состояние при напряжениях, соответствующих участку модуляции емкости, что искажает ВФХ в режиме обеднения [16].

Таблица

Параметры варизонного слоя и концентрации электронов, определенные разными методами

| Структура, № | $x_0$ | $A_1$ | $B_1$ , мкм | $n_{\text{холл}}, \text{см}^{-3}$ | $n_C, \text{см}^{-3}$ | $n_1, \text{см}^{-3}$ | $z_{\text{гр}}, \text{мкм}$ | $n_2, \text{см}^{-3}$ |
|--------------|-------|-------|-------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|
| 1            | 0,300 | 0,170 | 0,177       | $2,2 \times 10^{14}$              | $4,5 \times 10^{14}$  | $1,9 \times 10^{15}$  | 1,08                        | $5,1 \times 10^{14}$  |
| 2            | 0,298 | 0,173 | 0,112       | $1,5 \times 10^{15}$              | $3,2 \times 10^{15}$  | $2,8 \times 10^{15}$  | 0,47                        | $3,4 \times 10^{15}$  |

Одним из способов значительного снижения плотности медленных состояний является использование промежуточного между  $\text{HgCdTe}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  слоя  $\text{CdTe}$  [17, 18]. Это подтверждают результаты, полученные для структуры № 2. Холловская концентрация электронов для этой структуры в 2 раза меньше концентрации, полученной емкостными методами. Концентрация электронов, найденная из профиля ( $n_1 = 2,8 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ), меньше концентрации  $n_C$  на 14 %, а концентрации  $n_2$  на 21 %. Если учесть, что концентрация электронов вблизи нижней границы достигает  $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$  (превышает  $n_1$  на 78 %), то можно считать, что результаты моделирования качественно подтверждаются. Таким образом, значение минимальной емкости практически определяется концентрацией электронов на границе ОПЗ.

Для выяснения причин меньших значений  $n_1$  по сравнению с  $n_C$  и  $n_2$  необходимы дальнейшие исследования. Возможными причинами этого расхождения могут быть неточности аппроксимации распределения состава от координаты, также надо учитывать при использовании  $C^{-2}(V)$ -метода координатную зависимость диэлектрической проницаемости в варизонном слое (из-за изменения содержания  $\text{CdTe}$  по толщине в приповерхностном варизонном слое).

### Заключение

В работе показано, что неоднородное распределение концентрации электронов существенно влияет на вид ВФХ МДП-структуры на основе  $n\text{-HgCdTe}$  с приповерхностным варизонным слоем, что может исказить результаты определения спектра поверхностных состояний. Согласно ре-

зультатам моделирования, емкость в минимуме НЧ ВФХ определяется концентрацией электронов на границе ОПЗ с квазинейтральным объемом. При определении концентрационных профилей по наклону зависимости  $C^{-2}(V)$  в обеднении следует учитывать наличие приповерхностных варизонных слоев, которые влияют на границы диапазона определения концентрации. В случае наличия варизонного слоя можно определить концентрацию основных носителей заряда в большем диапазоне координат, но для определения верхней и нижней границ диапазона необходимо проведение численного моделирования, поскольку аналитические выражения для граничных координат невозможно получить для произвольного распределения состава в варизонном слое. Полученные результаты качественно подтверждены экспериментальными исследованиями зависимостей концентрации электронов от координаты.

*Авторы глубоко благодарны сотрудникам Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН Варавину В. С., Дворецкому С. А., Михайлову Н. Н., Якушеву М. В., Сидорову Г. Ю., Парму И. О. за предоставленные структуры.*

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках научных проектов № 18-43-700005 и 16-42-700759.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Capper P., Garland J. Mercury Cadmium Telluride: Growth, Properties and Applications. – Chichester: John Wiley & Sons, 2011.

2. Сидоров Ю. Г., Дворецкий С. А., Варавин В. С., Михайлов Н. Н., Якушев М. В., Сабина И. В. // ФТП. 2001. Т. 35. № 9. С. 1092.
3. Овсяк В. Н., Курьюшев Г. Л., Сидоров Ю. Г. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона. – Новосибирск: Наука, 2001.
4. Nicollian E. H., Brews J. R. MOS (metal oxide semiconductor) Physics and Technology. — New York et al.: Wiley, 1982.
5. Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Дзядух С. М., Бурлаков И. Д., Селяков А. Ю. // Прикладная физика. 2011. № 5. С. 80.
6. Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Дзядух С. М., Григорьев Д. В., Ляпунов Д. В. // Изв. вузов. Физика. 2017. Т. 60. № 1. С. 109.
7. Kesler V.G., Guzev A.A., Dvoretzkiy S.A., Zakirov E. R., Kovchavtsev A. P., Panova Z. V., Yakushev M. V. // Phys. Stat. Sol. (c). 2016. Vol. 13. No. 7–9. P. 643.
8. Brotherton S. D., Burton P. // Solid-State Electron. 1970. Vol. 13. No. 12. P. 1591.
9. Бормонтов Е. Н. Многослойные полупроводниковые структуры с неоднородно распределенными параметрами. – Дис. д-ра физ.-мат. наук: Воронеж, 2001.
10. Van Gelder W., Nicollian E. H. // J. Electrochem. Soc. 1971. Vol. 118. No. 1. P. 138.
11. Brews J. R. // J. Appl. Phys. 1973. Vol. 44. No. 7. P. 3228.
12. Fu R., Pattison J. // Optical Engineering. 2012. Vol. 51. No. 10. P. 104003.
13. Zhang P., Ye Z. H., Sun C. H., Chen Y. Y., Zhang T. N., Chen X., Lin C., Ding R. J., He L. // J. Electron. Mater. 2016. Vol. 45. No. 9. P. 4716.
14. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M. // J. Phys. Chem. Sol. 2017. Vol. 102. P. 42.
15. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M. // J. Electron. Mater. 2018. Vol. 47. P. 2694.
16. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M. // Russ. Phys. J. 2015. Vol. 58. P. 540.
17. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Varavin V. S., Dvoretzkiy S. A., Mikhailov N. N., Yakushev M. V., Sidorov G. Y. // Superlatt. Microstr. 2017. Vol. 111. P. 1195.
18. Дзядух С. М., Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Сидоров Г. Ю., Варавин В. С., Васильев В. В., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Якушев М. В. // Изв. вузов. Физика. 2017. Т. 60. № 11. С. 3.

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

## Modeling of the capacitance-voltage characteristics of MIS structures based on MBE HgCdTe at inhomogeneous distribution of composition and dopant

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

National Research Tomsk State University  
36 Lenin av., Tomsk, 634050, Russia  
E-mail: vav43@mail.tsu.ru

Received June 14, 2018

*It is shown that the inhomogeneous distribution of electron concentration has a significant effect on the shape of the capacitance-voltage characteristics of a MIS structure based on n-HgCdTe with a near-surface graded-gap layer, which can distort the results of determining the spectrum of surface states. The capacitance in the minimum of the low-frequency capacitance-voltage curve is determined by the electron concentration at the boundary of the space-charge region. When determining the concentration profiles from the slope of the  $C^{-2}(V)$  dependence in the depletion mode, one should take into account the presence of near-surface graded-gap layers that affect the boundaries of the range of determination of concentration. The obtained results agree qualitatively with the experimental data.*

**Keywords:** HgCdTe, molecular beam epitaxy, MIS structure, graded-gap layer, dopant concentration, capacitance-voltage characteristic, modeling.

### REFERENCES

1. P. Capper and J. Garland, *Mercury Cadmium Telluride: Growth, Properties and Applications* (John Wiley & Sons, Chichester, 2011).
2. Yu. G. Sidorov, S. A. Dvoretzkiy, V. S. Varavin, et al., *Semiconductors* **35**, 1045 (2001).
3. V. N. Ovsyuk, G. L. Kuryushev, and Yu. G. Sidorov, *Matrix Photodetectors for Infrared Range* (Nauka, Novosibirsk, 2001) [in Russian].

4. E. H. Nicollian and J. R. Brews, *MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology* (Wiley, New York, 1982).
5. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 80 (2011).
6. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, et al., *Russ. Phys. J.* **60**, 128 (2017).
7. V. G. Kesler, A. A. Guzev, S. A. Dvoretzkiy, et al., *Phys. Stat. Sol. (c)* **13**, 643 (2016).
8. S. D. Brotherton, P. Burton, *Solid-State Electron.* **13**, 1591 (1970).
9. E. N. Bormontov, *Multilayer semiconductor structures with inhomogeneously distributed parameters* (Dissertation of the doctor of sciences, Voronezh 2001) [in Russian].
10. W. Van Gelder, E. H. Nicollian, *J. Electrochem. Soc.* **118**, 138 (1971).
11. J. R. Brews, *J. Appl. Phys.* **44**, 3228 (1973).
12. R. Fu, J. Pattison, *Opt. Engin.* **51**, 104003 (2012).
13. P. Zhang, Z. H. Ye, C. H. Sun, et al., *J. Electron. Mater.* **45**, 4716 (2016).
14. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, *J. Phys. Chem. Sol.* **102**, 42 (2017).
15. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh S. M., *J. Electron. Mater.* **47**, 2694 (2018).
16. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh S. M., *Russ. Phys. J.* **58**, 540 (2015).
17. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, et al., *Superlatt. Microstr.* **111**, 1195 (2017).
18. S. M. Dzyadukh, A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, et al., *Russ. Phys. J.* **60**, 1853 (2018).