

**А. В. Войцеховский**<sup>1</sup>, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф., e-mail: vav@elefot.tsu.ru,

**Н. А. Кульчицкий**<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф., e-mail: n.kulchitsky@gmail.com,

**А. А. Мельников**<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф., **С. Н. Несмелов**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,

**А. П. Коханенко**<sup>1</sup>, д-р физ.-мат. наук, проф., **К. А. Лозовой**<sup>1</sup>, аспирант, **В. Г. Сатдаров**<sup>1</sup>, студент

<sup>1</sup> Томский государственный университет, (г. Томск), e-mail: vav43@mail.tsu.ru,

<sup>2</sup> Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики

(Технический университет, г. Москва)

## ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУР Si/Ge С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ Ge

Поступила в редакцию 25.11.2014

*Дается анализ литературных данных по электрическим свойствам наногетероструктур Ge/Si. Описаны особенности полупроводниковых структур с квантовыми точками и их электрофизические свойства. Проведен обзор методов измерения электрофизических параметров полупроводниковых Ge/Si-наногетероструктур с квантовыми точками Ge: вольт-фарадных характеристик, вольт-амперных характеристик, DLTS-спектров, температурных спектров проводимости.*

**Ключевые слова:** наногетероструктуры, квантовые точки, кремний, германий, солнечные элементы, фотопреобразователи, электрофизические характеристики, спектроскопия полной проводимости, адмиттанс, вольт-амперные характеристики

### Введение

Электрофизические и фотоэлектрические свойства полупроводниковых наногетероструктур на основе системы германий/кремний с квантовыми точками германия привлекают сегодня особенное внимание исследователей в связи с наличием в подобных структурах уникальных физических свойств, весьма перспективных для создания оптоэлектронных приборов с улучшенными характеристиками [1–6].

Для измерения электрофизических свойств существует ряд методов электрической спектроскопии, в которых основную роль играют процессы захвата и эмиссии носителей заряда. К ним относятся: метод вольт-амперных, вольт-фарадных характеристик, спектроскопия полной проводимости (адмиттанса) (*admittance spectroscopy*), нестационарная емкостная спектроскопия глубоких уровней (*deep level transient spectroscopy*, DLTS).

В настоящем обзоре рассмотрены электрофизические свойства гетероструктур Ge/Si с квантовыми точками, а также методики их измерения.

### Вольт-фарадные характеристики наногетероструктур Si/Ge

Метод вольт-фарадных характеристик заключается в следующем. Прикладывая переменное напряжение к структуре, содержащей квантовые точки, можно добиться того, что в течение одного полупериода захват носителей точками преобладает над эмиссией, а в другом полупериоде, наоборот, преобладает эмиссия. В результате массив квантовых точек будет перезаряжаться на частоте прило-

женного переменного напряжения, т. е. вести себя подобно конденсатору. Измеряя емкость при разных напряжениях смещения, можно получить информацию о концентрации носителей в образце, о заряде, накопленном квантовыми точками, и о плотности состояний. (Способ определения плотности состояний в квантовых ямах и ансамблях квантовых точек по вольт-фарадным характеристикам был развит в работе [7].)

В основе емкостной спектроскопии квантовых точек лежит тот факт, что заряд в нуль-мерных системах может изменяться только дискретным образом на величину

$$\delta Q = eN,$$

где  $e$  — заряд электрона,  $N$  — число точек в образце.

Внешнее напряжение  $V_g$  на управляющем электроде, смещая потенциал в островках по отношению к уровню Ферми в контакте, отделенным от островкового слоя туннельно-прозрачным барьером, стимулирует либо захват носителей из контакта на уровни квантовых точек, либо опустошение этих уровней в зависимости от полярности  $V_g$ . При совпадении уровня Ферми в контакте с энергией связанного состояния в квантовых точках дифференциальная емкость  $C(V_g) = dQ/dV_g$  должна иметь пик, свидетельствующий о наличии дискретного уровня энергии. Полная емкость структуры представляет собой сумму двух вкладов: первый обусловлен наличием области пространственного заряда в окружающем островки материале (в данном случае это кремний), второй вклад связан с перезарядкой квантовых точек [6, 8].

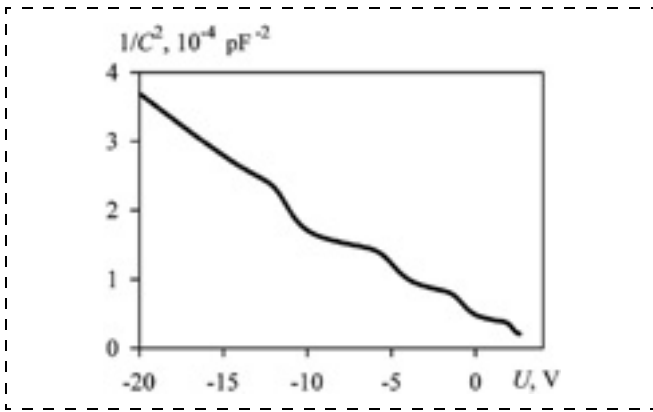


Рис. 1. Вольт-фарадная характеристика гетероструктуры с множественными квантовыми ямами [9]

Fig. 1. Capacity-voltage characteristic of the heterostructure with plural quantum holes [9]

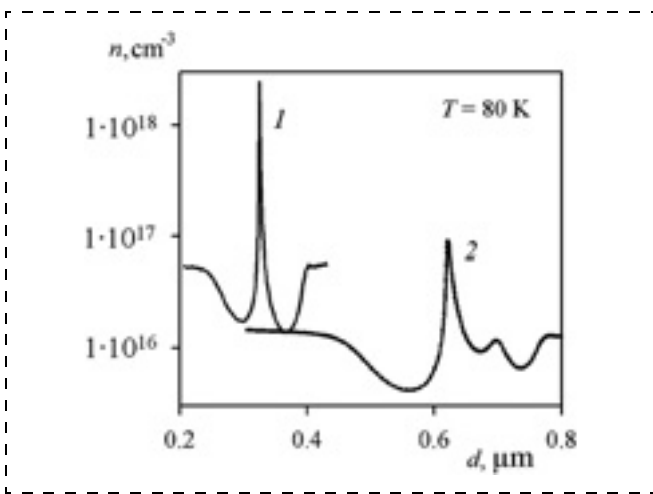


Рис. 2. Профиль концентрации носителей заряда в структуре с самоорганизующимися квантовыми точками InAs/GaAs (1) в сравнении с квантовой ямой InGaAs/GaAs (2) [10]

Fig. 2. Profile of concentration of the charge carriers in the structure with InAs/GaAs self-organizing quantum dots (1) in comparison with InGaAs/GaAs quantum well (2) [10]

Типичная вольт-фарадная ( $C-V$ ) характеристика гетероструктуры, содержащей несколько квантовых ям, приведена на рис. 1. Каждое горизонтальное плато на ней соответствует наличию, в общем случае, гетероперехода, квантовой ямы или квантовой точки. Причина появления плато на  $C-V$  зависимости объясняется тем, что область объемного заряда, расширяясь с увеличением приложенного смещения, пересекает своей границей участки обогащения основными носителями заряда, которые возникают вблизи гетероперехода, квантовой ямы или квантовой точки [9].

Дифференцирование  $C-V$  зависимости позволяет получить профиль концентрации основных носителей заряда по глубине гетероструктуры.

$P-n$ -гетеропереходы, содержащие слои квантовых точек InAs, выращивались на сильнолегированных подложках  $n^+$ -GaAs методом молекулярно-

пучковой эпитаксии или MOCVD-методом. Активная зона размещалась в середине толстого однородно легированного слоя  $n$ -GaAs и представляла собой один слой квантовых точек или три слоя вертикально связанных квантовых точек, разделенных туннельно-прозрачными барьерами GaAs [10]. Для создания  $p-n$ -перехода сверху наносился слой GaAs  $p$ -типа. На рис. 2 приведен типичный профиль концентрации носителей заряда в структуре с самоорганизующимися квантовыми точками InAs/GaAs.

Интегрируя площадь под концентрационной кривой, можно точно рассчитать заряд в квантовой точке. Для представленной гетероструктуры заряд  $q_{QD}$ , аккумулированный в массиве квантовых точек, равен  $q_{QD}/q = 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  при  $T = 200 \text{ K}$ . Сравнивая с данными микроскопии по латеральной плотности квантовых точек, можно определить число электронов в одной квантовой точке.

В работе [6] исследовались вольт-фарадные характеристики структур Si/Ge с квантовыми точками. В исследованных структурах с барьером Шоттки изменялась эффективная толщина  $d_{eff}$  слоя Ge квантовой точки. Структуры представляли следующее расположение слоев, начиная от подложки:

- $p^+$ -подложка Si(100), служащая нижним электрическим контактом;
- слой  $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.2}$  толщиной  $L = 10 \text{ нм}$ , обеспечивающий резкую гетерограницу последующего туннельного барьера Si;
- туннельно прозрачный барьер Si, концентрация дырок  $p = 7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ;
- слой нанокристаллов Ge;
- блокирующий слой Si,  $p = 7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ;  $L = 50 \text{ нм}$ ;
- управляющий заполнением островков электрод из Al, формирующий на границе с Si барьер Шоттки, площадь алюминиевой площадки  $\sim 8 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ .

Вольт-фарадные ( $C-V$ ) характеристики структур без слоя Ge имели обычный вид для обедненного слоя Si  $p$ -типа (рис. 3). В случае эффективной толщины слоя Ge  $d_{eff} = 2$  монослоя (МС) на характеристиках появляется плато, характерное для двумерного газа носителей. В области эффективных толщин Ge  $8 \leq d_{eff} \leq 13 \text{ ML}$  (ML — монослой) на  $C-V$  кривых появляются пики, расстояние между которыми, их ширина и положение на шкале напряжения (энергетической шкале) зависит от  $d_{eff}$ . С ростом  $d_{eff}$  пики становятся уже и уменьшаются энергетический зазор между ними.

В работе [11] исследовались электрические свойства многослойных массивов германиевых нанокластеров, выращенных на поверхности Si(001) при низких температурах. Рассматривались температурные зависимости  $C-V$  характеристик. На рис. 4 изображены  $C-V$  характеристики образцов, измеренные при комнатной температуре. Толщи-

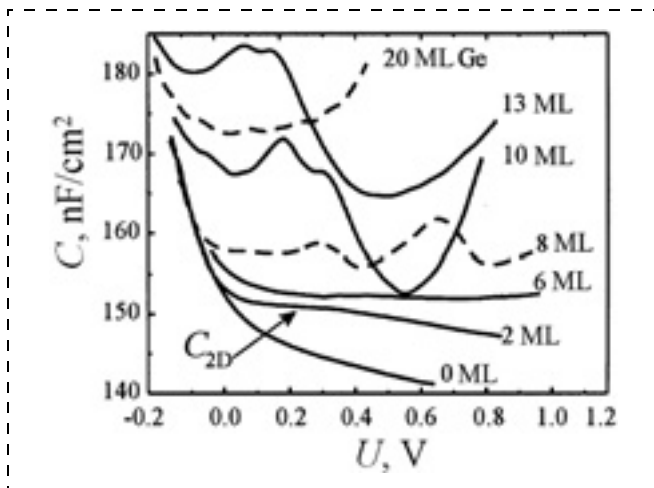


Рис. 3. Вольт-фарадные характеристики гетероструктур Ge-Si(001) с различной эффективной толщиной монослоя (ML) Ge. Температура измерения 300 K [6]

Fig. 3. Capacity-voltage characteristic of Ge-Si(001) heterostructures with various effective thickness of the Ge layer. The temperature of measurement was 300 K [6]

на напыленного слоя Ge для образца 1 составила 0,6 нм, для образца 2 — 1 нм, для образца 3 — 1,4 нм. Поверхностная плотность наностроек для образца 1 составила  $3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , для образца 2 —  $6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , для образца 3 —  $2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ .

Во всех структурах емкость не подчиняется закону  $1/V^{1/2}$  и для всех кривых наблюдаются пологие участки. На рис. 4 видно, что пологие участки кривых для каждого образца различны. Из ширины  $\Delta U$  и значения  $C_p$  (емкость на пологом участке) можно оценить концентрацию дырок в квантовых точках:

$$p = \Delta U C_p / (Sq),$$

где  $S$  — площадь диода Шоттки, а  $q$  — элементарный заряд. Получены следующие значения концентраций:  $p = 3,4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  для образца 1,  $p = 7 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  для образца 2,  $p = 1,7 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  для образца 3. Эти значения согласуются со значениями поверхностной плотности квантовых точек для каждого из образцов, число дырок, аккумулярованных в квантовых точках, пропорционально плотности квантовых точек.

$C$ - $V$  характеристики, записанные при разных температурах от 77 до 300 K, не показывают определенных особенностей для образцов 1 и 2, тогда как для образца 3 в пределах температур от 77 до 200 K наблюдался гистерезис  $C$ - $V$  характеристики. На вставке к рис. 4 видно, что пологий участок кривой при сканировании от обратного к прямому смещению (процесс захвата) имеет два плеча, которые могут ассоциироваться с захватом носителей двумя типами квантовых точек с двумя различными энергетическими уровнями. При сканировании в режиме обратного хода эмиссия происходит с од-

ного уровня, и на  $C$ - $V$  характеристике наблюдается только одно плечо. Это можно объяснить тем, что скорость эмиссии с одного уровня (с более глубокого) становится меньше, и носители "замораживаются" на этом уровне в квантовой точке.

Используя соотношения  $p = (q\epsilon_{\text{Si}}\epsilon_0)^{-1} C^3 / (dC/dV)$  и  $W = \epsilon_{\text{Si}}\epsilon_0 S C^{-1}$ , где  $p$  — концентрация дырок в квантовых точках,  $q$  — заряд электрона,  $\epsilon_{\text{Si}}$  — диэлектрическая проницаемость кремния,  $\epsilon_0$  — диэлектрическая постоянная,  $W$  — ширина зоны обеднения, а также из  $C$ - $V$  характеристик можно получить концентрационные профили заряда (рис. 5).

Из рис. 5 видно, что для образца 1 положение концентрационного пика, вызванного аккумуляцией дырок, близко к предполагаемому геометрическому положению слоя с квантовыми точками

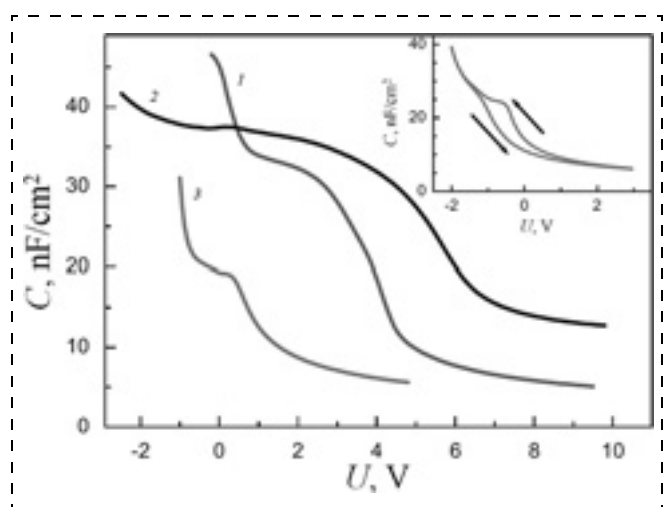


Рис. 4.  $C$ - $V$  характеристики трех структур (1, 2 и 3), измеренные при комнатной температуре (на вставке —  $C$ - $V$  характеристика образца 3, измеренная при 77 K в режиме обратного хода) [11]

Fig. 4.  $C$ - $V$  characteristics of structures (1, 2 and 3) at a room temperature (in the insert is the  $C$ - $V$  characteristics of sample 3 in a reverse motion mode) [11]

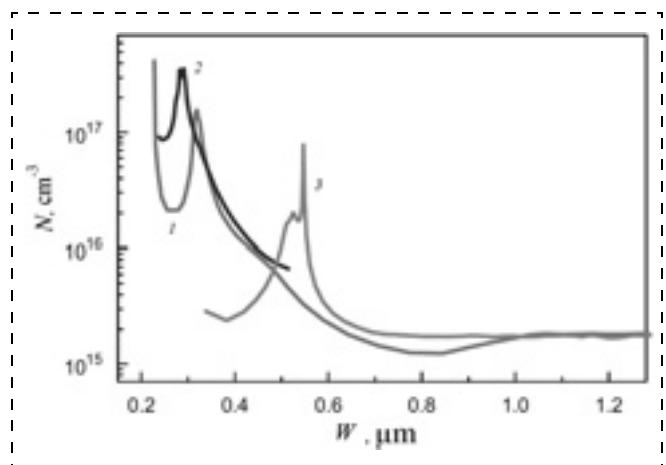


Рис. 5. Концентрационные профили образцов 1, 2 и 3, полученные из  $C$ - $V$  характеристик [11]

Fig. 5. Concentration profiles of samples 1, 2 and 3 of the  $C$ - $V$  characteristics [11]

(320 нм). Близкое значение получено также для образца 2 (290 нм). Для образца 3 полученная глубина концентрационного пика не соответствует ожидаемому геометрическому положению слоя с квантовыми точками и составляет 520 нм [11].

В работе [12] исследовались вольт-фарадные характеристики диодов Шоттки на основе гетероструктур Ge/Si с квантовыми точками Ge. Были получены  $C$ - $V$  характеристики образцов с различной толщиной  $d_{eff}$  осажденного слоя Ge. Измерения проводили при комнатной температуре на частоте  $f = 100$  кГц. Зависимость емкости от обратного смещения для образца, не содержащего Ge, не обладает никакими особенностями и имеет вид обычной  $C$ - $V$  характеристики для контакта Шоттки с полупроводником  $p$ -типа. В образцах с квантовыми точками Ge на вольт-фарадных кривых появляются характерные ступени, связанные с включением дополнительной емкости, которая обусловлена изменением заряда в слое квантовых точек. При нулевом смещении квантовые точки аккумулируют дырки и они имеют положительный заряд. При напряжении смещения  $U_b > 4$  В для  $d_{eff} = 6$  нм,  $U_b > 5$  В для  $d_{eff} = 8$  нм и  $U_b > 6$  В для  $d_{eff} = 10$  нм квантовые точки освобождаются от дырок и становятся нейтральными.

#### Нестационарная емкостная спектроскопия глубоких уровней и температурная спектроскопия проводимости

В работе [11] исследовались DLTS-спектры многослойных массивов германиевых нанокластеров, выращенных на поверхности Si(001) при низких температурах. Во всех исследованных структурах найдены максимумы DLTS-спектров при определенных обратных смещениях (рис. 6). Авторы работы предполагают, что пики, наблюдаемые в спектрах, вероятнее всего вызваны присутствием нанокластеров Ge.

На рис. 6 (кривые 1 и 2) видно, что спектры для образцов 1 и 2 имеют сложную форму и максимумы неразличимы. По этой причине не могут быть верно определены энергии активации центров с глубокими уровнями. И только для образца 3 определена энергия активации 260 мэВ, соответствующая максимуму при 235 К. Для всех структур также имеется максимум при 168 К, который наблюдался при разнообразных условиях измерений и вызван, вероятнее всего, присутствием объемных дефектов в образцах [11].

В методе температурной спектроскопии проводимости регистрируется активная часть адмиттанса (проводимость) как функция температуры. Температурное сканирование проводимости образца осуществляется при различных частотах  $\omega$  тестового сигнала, обеспечивая тем самым разные

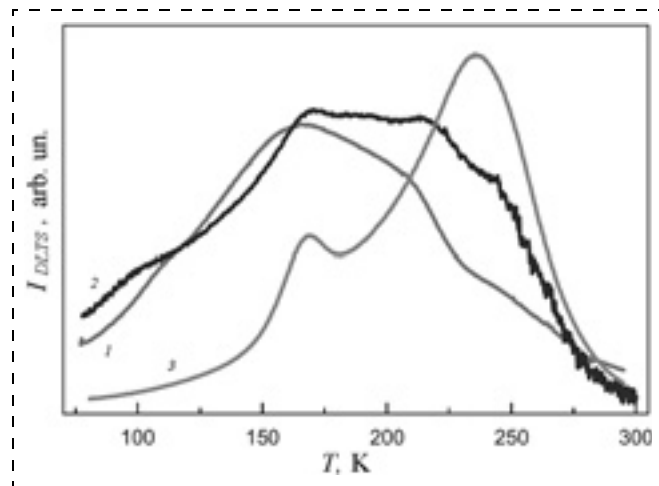


Рис. 6. DLTS-спектры образцов 1, 2 и 3 наногетероструктур Si/Ge с квантовыми точками Ge [11]

Fig. 6. DLTS-spectra of samples 1, 2 and 3 of Si/Ge nanoheterostructures with Ge quantum dots [11]

динамические условия эмиссии носителей с глубокого уровня или массива квантовых точек. Далее, построением графика Аррениуса в координатах  $\omega = f(1/T)$  для положений температурных максимумов спектров проводимости определяется энергия активации, характеризующая положение уровней квантования в квантовых точках. Совместный анализ этих двух методик может дать полную информацию о поведении носителей заряда в самоорганизующихся квантовых точках.

В спектрах проводимости  $p$ - $n$ -гетеропереходов с InAs/GaAs квантовыми точками при больших обратных смещениях ( $U_{обр} > 3$  В) в спектрах проводимости наблюдался один широкий пик. С понижением обратного смещения амплитуда сигнала проходила через максимум, и после этого на низкотемпературной стороне спектров появлялся второй пик. Обнаруженные пики связываются с эмиссией электронов с основного и возбужденного энергетических уровней в квантовых точках. Появление и модификация пиков объясняется тем, что с увеличением обратного смещения электрическое поле, проникая в слой квантовых точек, выталкивает энергетические уровни квантования вверх, и уровень электрохимического потенциала пересекает их один за другим, создавая условия для появления резонанса в эквивалентной измерительной цепи [13]. Обработка температурных спектров приводит к типичному семейству графиков Аррениуса для нахождения энергии активации эмиссионного процесса из массива квантовых точек.

По аналогии с глубокими уровнями в полупроводниках принцип спектроскопии адмиттанса структур с квантовыми точками основан на измерении комплексной проводимости системы, возникающей при перезарядке квантовых точек вследствие эмиссии носителей заряда из квантовых точек

в разрешенные зоны и их захвате на локализованные состояния в квантовых точках.

В работах [12, 14] исследовались кремниевые диоды Шоттки со встроенным в базу слоем квантовых точек Ge. На рис. 7 показаны зависимости проводимости  $G$ , нормированной на частоту  $\omega = 2\pi f$ , от температуры в различных образцах. Кривые были измерены при  $U_b = 2$  В и  $f = 50$  кГц. Как и в случае  $C-V$  характеристик, проводимость образца без квантовых точек Ge не имеет никаких особенностей. Для диодов Шоттки с квантовыми точками на зависимостях  $G(T)$  появляются максимумы, которые смещаются в сторону больших температур при увеличении размеров квантовых точек Ge.

Рост температуры  $T_{max}$ , при которой проводимость имеет максимум, можно объяснить либо заглублением дырочных уровней в квантовых точках при увеличении размера точек (увеличении  $d_{eff}$ ), либо уменьшением сечения захвата. На рис. 8 показаны температурные зависимости проводимости образца с  $d_{eff} = 6$  ML. Похожие кривые были получены и для образцов с другой толщиной слоя Ge. Качественно объяснить поведение  $G(T)$  можно следующим образом. При фиксированном смещении  $U_b$  происходит перезарядка уровня дырки в квантовых точках, совпадающего с уровнем Ферми в подложке  $p^+-Si$ . Темп эмиссии дырок с данного уровня уменьшается при понижении температуры, поэтому с уменьшением частоты зондирующего напряжения условие максимума проводимости достигается при меньших температурах (рис. 8, а).

При увеличении обратного смещения в процессах проводимости начинают принимать участие дырки, локализованные на все более глубоких уровнях в квантовых точках. По этой причине с ростом  $U_b$  максимум проводимости на рис. 8, б сдвигается в сторону больших температур. При  $U_b > 4$  В квантовые точки Ge полностью опустошаются и максимум  $G(T)$ , связанный с перезарядкой квантовых точек, исчезает.

В работе [15] методом спектроскопии полной проводимости исследовалась электронная структура кремниевого диода с барьером Шоттки с четырьмя слоями Ge квантовых точек, внедренными в матрицу Si. В системе Ge/Si квантовых точек дырки локализуются в Ge, а электроны свободны в зоне проводимости Si. В многослойных структурах с квантовыми точками эластичные напряжения приводят к изгибу зон на границе с квантовыми точками. Таким образом, возможно наблюдать локализацию электронов в кремнии на границе с квантовыми точками.

Авторы [15] ожидают, что с увеличением числа слоев квантовых точек увеличится эластичное напряжение, что приведет к увеличению глубины потенциальной ямы и изменению энергии локализации электрона. Исследованный ими образец был

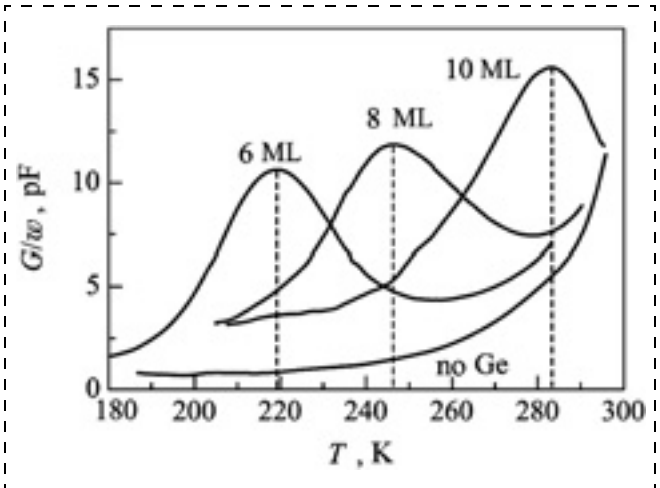


Рис. 7. Зависимости активной части адмиттанса от температуры в образцах с различной толщиной осажденного слоя Ge, измеренные при  $U_b = 2$  В на частоте  $f = 50$  кГц [12]

Fig. 7. Dependences of the active part of admittance on temperature in the samples with various thickness of the deposited layer of Ge at  $U_b = 2$  V on frequency  $f = 50$  kHz [12]

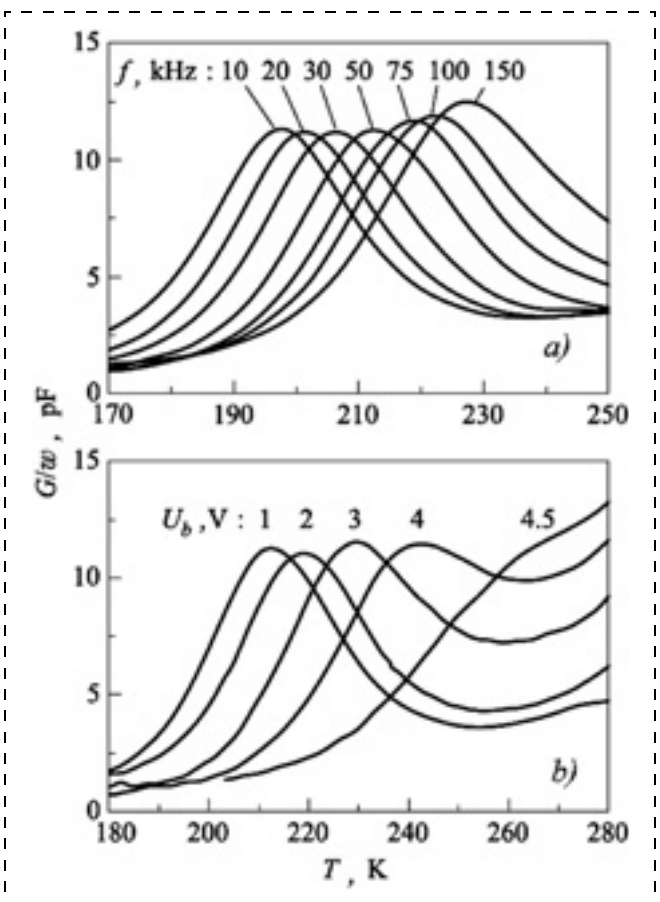


Рис. 8. Температурные зависимости проводимости образца с толщиной осажденного слоя Ge  $d_{eff} = 6$  ML при:

а — фиксированном обратном смещении  $U_b = 1$  В и разных частотах зондирующего напряжения и б — фиксированной частоте  $f = 50$  кГц и различном смещении [12]

Fig. 8. The temperature dependences of conductivity of the sample with thickness of the deposited layer of Ge  $d_{eff} = 6$  ML at: а — fixed reverse shift  $U_b = 1$  V and different frequencies of the probing voltage; б — fixed frequency of  $f = 50$  kHz and various shifts [12]

выращен методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке  $n^+$ -Si(001), легированной сурьмой до концентрации  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Первый и второй слой Ge, а также третий и четвертый слой разделены 3 нм Si, в то время как второй и третий слой Ge разделены 5 нм Si. Для сравнения был выращен образец при таких же условиях, но не содержащий Ge. При измерении температурных спектров проводимости образцов было обнаружено, что для обоих образцов наблюдаются максимумы в области 20 К, а для образца с квантовыми точками Ge еще один максимум в области 30...40 К. Положение первого пика, в отличие от второго, не меняется с изменением приложенного напряжения. Авторы [15] связывают первый пик с уровнем примеси, а другой пик — с уровнем электронов в зоне проводимости Si на границе с квантовыми точками.

### Вольт-амперные характеристики

Развитие волоконно-оптических сетей связи стимулировало разработки эффективных оптоэлектронных компонентов, таких как фотодетекторы и светоизлучающие структуры, действующих в ближней ИК области спектра. В работах [18—23] исследовались  $p$ - $i$ - $n$ -фотодиоды на основе многослойных структур Ge/Si с квантовыми точками Ge. В работах было получены темновые вольт-амперные характеристики структур. На рис. 9 изображены вольт-амперные характеристики (ВАХ) типичного диода.

На рис. 10 изображены полученные в работе [23] вольт-амперные характеристики для трех образцов: А, В, и С при 77 К. Толщины спейсерных слоев составляли 20, 20 и 50 нм, уровни легирования Ge —  $6 \cdot 10^{18}$ ,  $0,6 \cdot 10^{18}$  и  $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  соответственно для образцов А, В, и С.

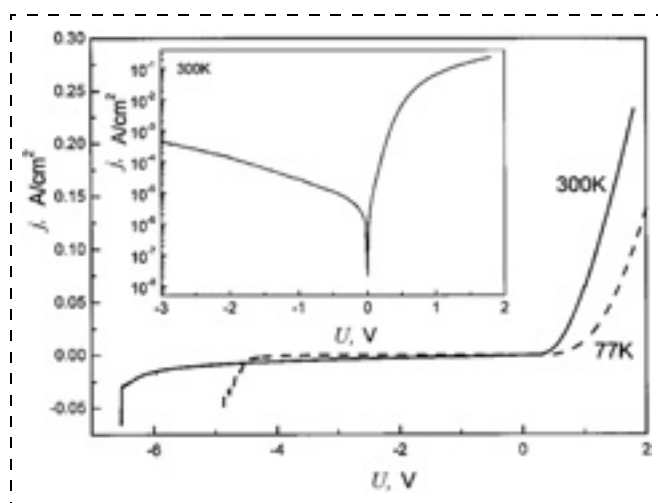


Рис. 9. Вольт-амперные характеристики  $p$ - $i$ - $n$ -диода с квантовыми точками Ge при 77 и 300 К [22]  
Fig. 9. VAC of a  $p$ - $i$ - $n$ -diode with Ge quantum dots at 77 K and 300 K [22]

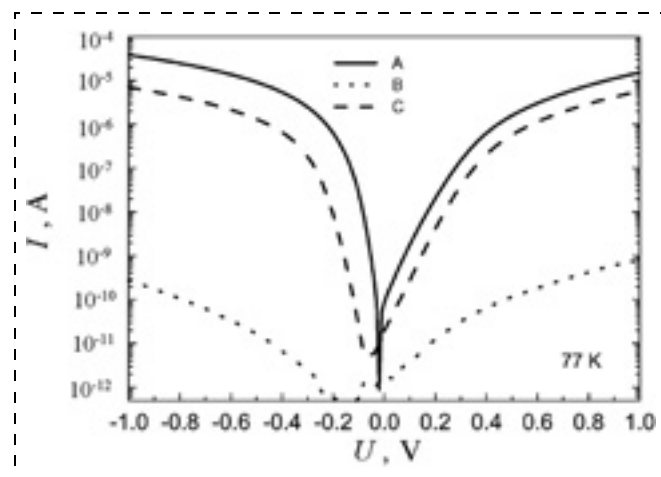


Рис. 10. Темновые вольт-амперные характеристики, измеренные при 77 К, для образцов А, В и С с различными уровнями легирования Ge и различными толщинами спейсерных слоев [23]  
Fig. 10. Dark VAC measured at 77 K for samples A, B and C with various levels of Ge doping and various thicknesses of the spacer layers [23]

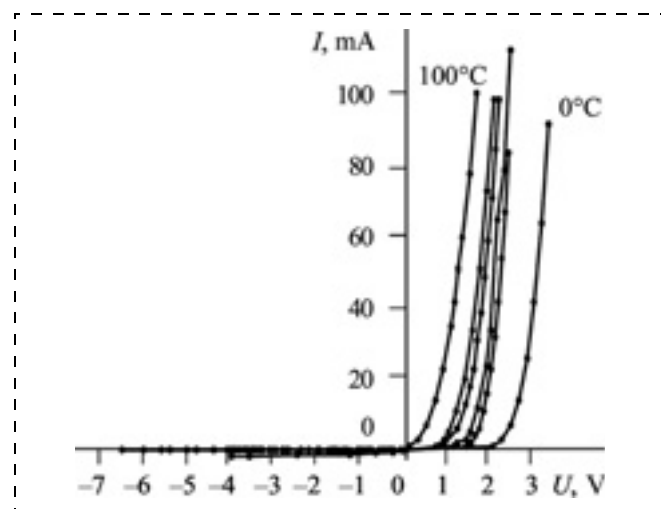


Рис. 11. Темновые вольт-амперные характеристики кремниевого торцевого фотоэлектрического преобразователя [24]  
Fig. 11. Dark VAC of the silicon butt photo-electric converter [24]

Сравнивая результаты для образцов А и С, можно заметить, что с увеличением толщины спейсерного слоя темновой ток уменьшается. Это происходит в основном из-за ослабления электрического поля. Сравнивая результаты для образцов А и В, можно увидеть, что с увеличением уровня легирования в 10 раз темновой ток увеличивается на 4...5 порядков по величине. Это происходит отчасти из-за большей плотности носителей заряда. К тому же энергия уровня Ферми увеличивается при легировании [22].

Для сравнения со структурами, содержащими квантовые точки, на рис. 11 представлены темновые вольт-амперные характеристики кремниевых фотоэлектрических преобразователей на основе  $p$ - $i$ - $n$ -структур, исследованных в работе [24], измеренные в диапазоне температур 0...100 °С.

Анализ прямых ветвей темновых ВАХ показывает, что напряжение отсечки с повышением температуры уменьшается от значения порядка 1,9 В при 0 °С до 0,4 В при 100 °С [24].

Таким образом, на основе проведенного обзора можно сделать вывод о том, что энергии активации эмиссии дырок из квантовых точек в исследованных структурах Si/Ge с одним слоем квантовых точек (диоды Шоттки), полученные в различных работах методами нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней и температурной спектроскопии проводимости, лежат в пределах 200...700 мэВ.

Для исследования солнечных элементов наиболее важным с практической точки зрения является исследование ВАХ, так как на ее основе может быть определена эффективность преобразования элемента, степень влияния паразитных сопротивлений.

## Заключение

В настоящей работе проведен обзор электронной структуры и электрофизических свойств материалов на основе наногетероструктур Ge/Si с квантовыми точками Ge, обзор методов измерения электрофизических параметров полупроводниковых наногетероструктур с квантовыми точками. Существует ряд методов электрической спектроскопии, в которых основную роль играют процессы захвата и эмиссии носителей заряда. К ним относятся: метод вольт-фарадных характеристик, спектроскопия полной проводимости (адмиттанса) (*admittance spectroscopy*), нестационарная емкостная спектроскопия глубоких уровней (*deep level transient spectroscopy*, DLTS). Измеряя емкость при разных напряжениях смещения, можно получить информацию о концентрации носителей в образце, о заряде, накопленном квантовыми точками, и о плотности состояний. Измерения комплексной проводимости (адмиттанса) кремниевых барьеров Шоттки с захороненным слоем квантовых точек Ge позволяют получить дополнительную информацию о структуре энергетического спектра квантовых точек и параметрах дырочных состояний. В методе температурной спектроскопии проводимости регистрируется активная часть адмиттанса (проводимость) как функция температуры. Температурное сканирование проводимости образца осуществляется при различных частотах  $\omega$  тестового сигнала, обеспечивая тем самым разные динамические условия эмиссии носителей с глубокого уровня или массива квантовых точек. Далее, построением графика Аррениуса в координатах  $\omega = f(1/T)$  для положений температурных максимумов спектров проводимости определяется энергия активации, ха-

рактеризующая положение уровней квантования в квантовых точках. Измерения темновых вольт-амперных характеристик позволяют оценить уровень темнового тока в полупроводниковых *p-i-n*-фотодиодах со встроенными слоями квантовых точек.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта *p\_Sибирь\_a* № 13-07-98023.*

## Список литературы

1. Шкляев А. А., Ичикава М. Предельно плотные массивы наноструктур германия и кремния // Успехи физических наук. 2008. Т. 178. № 2. С. 139—169.
2. Войцеховский А. В., Кульчицкий Н. А., Мельников А. А., Несмелов С. Н., Коханенко А. П., Лозовой К. А. Особенности создания кремний-германиевых наноструктур с квантовыми точками для перспективных приборов микро- и оптоэлектроники // Наноинженерия. 2014. № 6. С. 3—20.
3. Войцеховский А. В., Кульчицкий Н. А., Мельников А. А., Несмелов С. Н., Коханенко А. П., Лозовой К. А. Технология создания структур с квантовыми точками Ge/Si молекулярно-лучевой эпитаксией // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 9. С. 20—31.
4. Егоров В. А., Цырлин Г. Э., Тонких А. А. и др. Si/Ge наноструктуры для применений в оптоэлектронике // ФТТ. 2004. Т. 46. № 1. С. 53—59.
5. Войцеховский А. В., Коханенко А. П., Лозовой К. А., Турапин А. М., Романов И. С. Фоточувствительные структуры на основе наногетероструктур Si/Ge для оптических систем передачи информации // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 3. С. 338—343.
6. Пчеляков О. П., Болховитянов Ю. Б., Двуреченский А. В., Соколов Л. В., Никифоров А. И., Якимов А. И., Фойхтлендер Б. Кремний-германиевые наноструктуры с квантовыми точками: механизмы образования и электрические свойства // ФТП. 2000. Т. 34. № 11. С. 1281—1299.
7. Алешкин В. Я., Бекин Н. А., Буянова М. Н. и др. Определение плотности состояний в квантовых ямах и ансамблях квантовых точек вольт-фарадным методом // ФТП. 1999. Т. 33. № 10. С. 1246—1252.
8. Якимов А. И., Двуреченский А. В., Никифоров А. И., Пчеляков О. П. Формирование нуль-мерных дырочных состояний при молекулярно-лучевой эпитаксии Ge на Si(100) // Письма в ЖЭТФ. 1998. Т. 68. № 2. С. 125—130.
9. Зубков В. И. Спектроскопия адмиттанса — эффективный метод диагностики полупроводниковых структур // Приложение к журналу "Вестник РГРТУ". 2009. № 4.
10. Зубков В. И. Диагностика полупроводниковых наногетероструктур методами спектроскопии адмиттанса. СПб.: Изд-во "Элмор", 2007. 220 с.
11. Feklisova O. V., Yakimov E. B., Arapkina L. V. et al. Capacitance investigation of Ge nanoclusters on a silicon (001) surface grown by MBE at low temperatures // Physica B: Condensed matter. Proceedings of the 25th International Conference on Defects in Semiconductors ICDS-24. 2009. V. 404. № 23—24. P. 4705—4707.
12. Якимов А. И., Двуреченский А. В., Никифоров А. И. и др. Правило Мейера-Нельделя в процессах термоэмиссии и захвата дырок в квантовых точках Ge/Si // Письма в ЖЭТФ. 2004. Т. 80. № 5. С. 367—371.

13. Zubkov V. I., Kapteyn C. M. A., Solomonov A. V. et al. Voltage-capacitance and admittance investigations of electron states in self-organized InAs/GaAs quantum dots // *J. of Physics: Condens. Matter*. 2005. V. 17. P. 2435.
14. Володин В. А., Якимов А. И., Двуреченский А. В. и др. Модификация квантовых точек в наноструктурах Ge/Si импульсным лазерным облучением // *ФТП*. 2006. Т. 40. № 2. С. 207—214.
15. Yakimov A. I., Dvurechenskii A. V., Nikiforov A. I. et al. Electronic states in Ge/Si quantum dots with type-II band alignment initiated by space-charge spectroscopy // *Physical Review B*. 2006. V. 73. P. 115333.
16. Asperger T., Miesner C., Brunner K. et al. Admittance spectroscopy of Ge quantum dots in Si // *Thin Solid Films*. 2000. V. 380. P. 227—229.
17. Miesner C., Asperger T., Brunner K. et al. Capacitance-voltage and admittance spectroscopy of self-assembled Ge islands in Si // *Applied Physics Letters*. 2000. V. 77. № 17. P. 2704—2706.
18. Yakimov A. I., Dvurechenskii A. V., Nikiforov A. I. et al. Interlevel Ge/Si quantum dot infrared photodetector // *Journal of applied physics*. 2001. V. 29. № 10. P. 5676—5681.
19. Якимов А. И., Двуреченский А. В., Никифоров А. И. и др. Фотодиоды Ge/Si со встроенными слоями квантовых точек Ge для ближней инфракрасной области (1,3—1,5 мкм) // *ФТП*. 2003. Т. 37. № 11. С. 1383—1388.
20. Colase L., Assanto G. Ge-on-Si photodetectors for optical receivers // *International journal of microwave and optical technology*. 2008. V. 3. № 3. P. 404—411.
21. Hsu B. C., Lin C. H., Kuo P. S. et al. Novel MIS Ge—Si quantum-dot infrared photodetectors // *IEEE electron device letters*. 2004. V. 25. № 8. P. 544—546.
22. Tong S., Liu J. L., Wan J. et al. Normal-incidence Ge quantum-dot photodetectors at 1,5 μm based on Si substrate // *Applied physics letters*. 2002. V. 80. № 7. P. 1189—1191.
23. Wang K. L., Cha D., Liu J. et al. Ge/Si self-assembled quantum dots and their optoelectronic device applications // *Proceedings of the IEEE*. 2007. V. 95. № 9. P. 1866—1883.
24. Курак В. В., Цыбуленко В. В., Арбомассу В. Л. Технологический аспект повышения эффективности полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2002. № 6. С. 26—29.

A. V. Voitsekhovskiy<sup>1</sup>, D. Sc., Head of Chair, e-mail: vav@elefot.tsu.ru,  
 N. A. Kulchitskiy<sup>2</sup>, D. Sc., Prof., A. A. Melnikov<sup>2</sup>, D. Sc. (Tech.), Prof.,  
 S. N. Nesmelov<sup>1</sup>, PhD., Senior Researcher, A. P. Kokhanenko<sup>1</sup>, D. Sc., Prof.,  
 K. A. Lozovoy<sup>1</sup>, Graduate Student, V. G. Satdarov<sup>1</sup>, Student

<sup>1</sup> Tomsk State University (Tomsk), e-mail vav43@mail.tsu.ru

<sup>2</sup> Moscow State Institute of Radio Engineering, Electronics and Automation (Technical University, Moscow), e-mail: n.kulchitskiy@gmail.com

## Electrophysical Properties of Ge/Si Heterostructures with Ge Quantum Dots

*This paper presents an analysis of the literature data on the electric properties of nanoheterostructures of Ge/Si. It describes specific features of the semiconductor structures with quantum dots and their electrophysical properties. A review was done of the methods for measurement of the electrical parameters of the semiconductor Ge/Si nanoheterostructures with Ge quantum dots: capacity-voltage characteristics, voltage-current characteristics, DLTS-spectra, thermal conductivity spectra.*

**Keywords:** nanoheterostructures, quantum dots, silicon, germanium, solar cells, photodetectors, electrophysical properties, admittance spectroscopy, admittance, voltage-current characteristics

### Introduction

Electrophysical and photo-electric properties the semiconductor nanoheterostructures on the basis of germanium/silicon with quantum dots of germanium attract attention in connection with the presence in them of unique properties, perspective for development of optoelectronic devices with improved characteristics [1—6].

For measurement of the electrophysical properties there are used methods of electric spectroscopy, in which the basic role is played by capture and emission of the charge carriers. Among them are the volt-ampere method, capacity-voltage characteristics, admittance spectroscopy and deep level transient spectroscopy (DLTS).

In the present review the electrophysical properties of Ge/Si heterostructures with quantum dots and also techniques of their measurement are discussed.

### Capacity-voltage characteristics of Si/Ge nanoheterostructures

The method boils down to the following. By applying an alternating voltage to the structure containing the quantum dots we can achieve the following — during one half-cycle the capture of the carriers by the dots prevails over the emission, and in the other half-cycle, on the contrary, the emission prevails.

As a result the mass of the quantum dots is recharged on the frequency of the applied alternating voltage, i.e. it works like a capacitor. By measuring the capacity at different shift voltages it is possible to obtain information on the concentration of the carriers in a sample, about the charge accumulated by the quantum dots, and about the density of the states. (The method of determination of the density of states in the quantum



holes and ensembles of the quantum dots by the capacity-voltage characteristics is developed in [7].)

At the heart of the capacity spectroscopy of the quantum dots lays the fact, that a charge in zero-dimensional systems can change in a discrete way the value of  $\delta Q = eN$ , where  $e$  — is an electron charge,  $N$  — is a number of dots in a sample. The external voltage of  $V_g$  on the control electrode, displacing the potential in the islets in relation to Fermi level in the contact, separated from the islet layer by a tunnel-transparent barrier, stimulates the capture of the carriers from the contact on the levels of the quantum dots or a devastation of these levels, depending on the polarity of  $V_g$ . If Fermi level coincides in a contact with the energy of the bound state in the quantum dots, the differential capacity

$$C(V_g) = dQ/dV_g$$

should have a peak, testifying to the presence of a discrete level of energy. The full capacity of the structure represents the sum of two contributions: the first is due to the presence of the area of a spatial charge in the material surrounding the islets (in this case it is silicon), the second ( $C_{QD}$ ) is connected with a recharge of the quantum dots [6, 8].

Typical capacity-voltage ( $C$ - $V$ ) characteristic of a heterostructure containing several quantum holes is presented in fig. 1. Each horizontal plateau in it corresponds to the presence of a heterojunction, quantum holes or dots. Its appearance in  $C$ - $V$  dependences is explained by the fact that the area of a volume charge, extending with an increase of the applied shift, crosses the sites of enrichment with the basic charge carriers, which arise near the heterojunction, quantum holes or dots [9].

$C$ - $V$  differentiation allows us to obtain a profile of concentration of the basic charge carriers on the depth of a heterostructure.  $P$ - $n$ -heterojunctions containing layers of InAs quantum dots were grown on highly doped  $n$ -GaAs substrates by the method of molecule-beam epitaxy or MOCVD-method. The active zone was in the middle of a thick homogeneously alloyed layer of  $n$ -GaAs and represented one layer of the quantum dots or three layers of vertically bound quantum dots divided by GaAs tunnel-transparent barriers [10]. For creation of a  $p$ - $n$  junction a GaAs layer of  $p$ -type was deposited from above. Fig. 2 presents the profile of the concentration of the charge carriers in the structure with InAs/GaAs self-organizing quantum dots.

By integrating the area under the concentration curve, it is possible to calculate a charge in QD. For the presented heterostructure the charge accumulated in the mass of the quantum dots is equal to  $5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  at 200 K. By comparing the microscopy data on the lateral density of QD, it is possible to determine the quantity of electrons in one quantum point.

In [6] the capacity-voltage characteristics of Si/Ge structures with quantum points were investigated. In them the effective thickness of  $d_{eff}$  layer of Ge quantum points changed together with Schottky barrier. The structures represented a number of layers beginning from a substrate:

- $p^+$ -substrate of Si(100), which served as the lower electric contact;
- $\text{Si}_{0,5}\text{Ge}_{0,2}$  layer with thickness of  $L = 10 \text{ nm}$ , which ensured the heteroborder of the next tunnel barrier of Si;
- tunnel transparent barrier of Si,  $p = 7 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ;
- layer of nanocrystals of Ge;
- blocking layer of Si,  $p = 7 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ;  $L = 50 \text{ nm}$ ;
- electrode of Al controlling filling of the islets and forming a Schottky barrier on the border with Si, the area of the aluminum plot was  $\sim 8 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$ .

The capacity-voltage ( $C$ - $V$ ) characteristics of the structures without a Ge layer had a usual appearance for the impoverished layer of Si (fig. 3). In case of an effective thickness of Ge  $d_{eff} = 2$  of a monolayer (ML), a plateau appears on the characteristics, typical for the two-dimensional carrier gas. In the range of the effective thicknesses of Ge  $8 \leq d_{eff} \leq 3 \text{ ML}$  on  $C$ - $V$ -curves, peaks appear, the distance between which, their width and position on a voltage scale (energy scale) depends on  $d_{eff}$  with the growth of  $d_{eff}$  peaks become narrower and the energy gap between them also decreases.

In [11] the electric properties of the multilayer mass of the germanium nanoclusters, grown on the surface of Si(001) were investigated at low temperatures. Temperature dependences of  $C$ - $V$ -characteristics were considered. Fig. 4 presents  $C$ - $V$ -characteristics of the sample at a room temperature. The thickness of the deposited layer of Ge for sample 1 — 0,6 nm, for 2 — 1,0 nm, for 3 — 1,4 nm. The surface density of the nano-islets for sample 1 —  $3 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ , for 2 —  $6 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ , for 3 —  $2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ .

In all structures the capacity did not obey the law of  $1/V^{1/2}$  and for all the curved lines gently sloping sites were observed. Fig. 4 demonstrates that they are different for each sample.

From width  $\Delta U$  and  $C_p$  it is possible to estimate the concentration of holes in the quantum dots:

$$p = \Delta U \cdot C_p / (S \cdot q),$$

where  $S$  — is Shottky diode area, and  $q$  — is an elementary charge. The following concentrations were obtained:  $p = 3,4 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  for sample 1,  $p = 7 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  for 2,  $p = 1,7 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  for 3. They agree with the surface density of the quantum dots for each sample. The number of the holes accumulated in the quantum dots is proportional to their density.

The  $C$ - $V$ -characteristics, which were recorded at temperatures from 77 up to 300 K do not show any spe-

cific features of samples 1 and 2, while for sample 3 within temperatures from 77 up to 200 K a hysteresis of the  $C$ - $V$ -characteristics was observed. The insert to fig. 4 demonstrates that the flat site of the curve at scanning from the reverse to direct shift (capture) has two shoulders, which can associate with the capture of the carriers by two types of the quantum dots with two various energy levels. During scanning in the mode of a reverse motion an emission occurs from one level, and on  $C$ - $V$ -characteristics only one shoulder is observed. This can be explained by the fact that the speed of emission from one deeper level becomes less, and the carriers "are frozen" at that level in a quantum dot.

By using the correlations  $p = (q\varepsilon_{\text{Si}}\varepsilon_0)^{-1}C^3/(dC/dV)$  and  $W = \varepsilon_{\text{Si}}\varepsilon_0SC^{-1}$ , from  $C$ - $V$ -characteristics it is possible to obtain the concentration profiles of a charge (fig. 5).

It is visible that for sample 1 the position of the concentration peak caused by accumulation of holes is close to the prospective geometrical position of the layer with the quantum dots (320 nm). A close value was also received for sample 2 (290 nm). For sample 3 the received depth of the concentration peak did not correspond to the expected geometrical position of the layer with the quantum dots and equaled to 520 nm [11].

In [12] the capacity-voltage characteristics of Schottky diodes on the basis of Ge/Si heterostructures with Ge quantum dots were investigated. The capacity-voltage ( $C$ - $V$ ) characteristics of the samples were obtained with various thickness of the deposited Ge  $d_{\text{eff}}$  layer. Measurements were done at a room temperature on the frequency of  $f = 100$  kHz. The dependence of the capacity on the reverse shift for the sample, which did not contain Ge, had no specific features and looked like a regular  $C$ - $V$  characteristic for a Schottky contact with a  $p$ -type semiconductor. In the samples with Ge quantum dots on the capacity-voltage curves the steps appeared connected with the inclusion of an additional capacity, which was due to a change of a charge in the layer of the quantum dots. At a zero shift the quantum dots accumulated holes and were charged positively. At  $U_b > 4$  V for  $d_{\text{eff}} = 6$  ML,  $U_b > 5$  V for  $d_{\text{eff}} = 8$  ML and  $U_b > 6$  V for  $d_{\text{eff}} = 10$  ML they were released from the holes and became neutral.

### Deep level transient spectroscopy and temperature spectroscopy of conductivity

In [11] DLTS-spectra of the multilayered mass of germanium nanoclusters, grown on the surface of Si(001) at low temperatures, were investigated. In all the structures the maxima of DLTS spectra were found at certain reverse shifts (fig. 6). The authors believe that the peaks in the spectra were probably due to the presence of Ge nanoclusters.

In fig. 6 (curved lines 1 and 2) it is visible, that the spectra for them has a complex form, and the maxima are unsolvable. Therefore, it is impossible to determine reliably the energy of activation of the centers with deep levels. Only for sample 3 the energy of activation was determined as 260 meV, corresponding to the maximum at 235 K. For all structures there was also a maximum at 168 K, observed at different conditions of measurements and caused, possibly, by the presence of volume defects in the samples [11].

The method of the temperature spectroscopy of conductivity records the active part of admittance (conductivity) as a temperature function. Temperature scanning of conductivity of a sample is carried out at various frequencies  $\omega$  of the test signal, ensuring different dynamic conditions for emission of carriers from a deep level or a mass of the quantum dots (QD). Further, by construction of Arrhenius plot in coordinates  $\omega = f(1/T)$  for the temperature maxima of the spectra of conductivity, the energy of activation is determined characterizing the position of the levels of quantization in the quantum dots. A joint analysis of these techniques can provide complete information on the behavior of the charge carriers in the self-organizing quantum dots.

In the spectra of conductivity of  $p$ - $n$ -junctions with InAs/GaAs QD in case of big reverse shifts ( $U_b > 3$  V) one wide peak was observed. With a decline of the reverse shift the amplitude of the signal passed through the maximum, and after that, on the low-temperature side of the spectra a second peak appeared. The discovered peaks were bound with the emission of electrons from the basic and excited energy levels in QD. The appearance and modification of the peaks are explained by the fact that with an increase of the reverse shift the electric field, penetrating into the layer of QD, pushes the energy levels of the quantization up and the level of the electrochemical potential crosses them one by one, creating conditions for appearance of a resonance in the equivalent measuring chain [13]. Processing of the temperature spectra leads to typical Arrhenius plots for discovery of the energy of activation of the emission process from the mass of QD.

By analogy with the deep levels in semiconductors, the spectroscopy principle of admittance of the structures with QD is based on measurement of a complex conductivity of the system arising during their recharge owing to emission of the charge carriers from QD in the permitted bands and their capture on the localized states in QD.

In [12, 14] the silicon Schottky diodes with QD layer of Ge embedded in the base were investigated. Fig. 7 demonstrates the frequency normalized dependences of conductivity, on the temperature in various samples. The curves were measured at  $U_b = 2$  V and  $f = 50$  kHz. Just like in case of  $C$ - $V$ -characteristics, the conductivity

of the sample without Ge QD had no specific features. For Schottky diodes with QD on dependences of  $G(T)$  the maxima appear, which are shifted towards the big temperatures during increase of Ge QD in sizes.

The growth of  $T_m$  at which conductivity has its maximum, can be explained by embedding of the hole levels in QD in case of an increase of the size of the dots ( $d_{eff}$ ) or reduction of the section of a capture. Fig. 8 demonstrates the temperature dependencies of a sample's conductivity  $d_{eff} = 6$  ML. Similar curves were received for the samples with other thicknesses of Ge. Qualitatively, it is possible to explain the behavior of  $G(T)$  in the following way. In case of a fixed shift of  $U_b$  a recharge of the level of a hole in QD appears, coinciding with the level of Fermi in the substrate of  $p^+$ -Si. The rate of emission of the holes from the given level decreases with the fall of temperature, therefore with a reduction of the frequency of the probing voltage the conductivity maximum is reached at lower temperatures (fig. 8, *a*).

With an increase of the reverse shift in conductivity the holes, localized at the deeper and deeper levels of QD, begin to take part in conductivity. For this reason with the growth of  $U_b$  the conductivity maximum (fig. 8, *b*) shifts towards higher temperatures. At  $U_b > 4$  V Ge QD are completely devastated and the maximum  $G(T)$ , connected with their recharge, disappears.

In [15] by the method of spectroscopy of full conductivity the electronic structure of the silicon diode with Schottky barrier with four Ge layers of the quantum dots introduced in Si matrix was investigated. In Ge/Si QD system the holes are localized in Ge, while the electrons are free in the zone of conductivity of Si. In the multilayer structures with QD the elastic strains lead to a bend of the border zones. So, it is possible to observe a localization of the electrons in silicon on the border with QD. It is expected, that with an increase of the number of QD layers the elastic strain will also increase, which will result in a bigger depth of a potential hole and change of energy of the electron localization. The investigated sample was grown by MBE on a substrate of  $n^+$ -Si(001), by alloyed antimony up to the concentration of  $\sim 10^{19}$  cm $^{-3}$ . The first and the second layers of Ge, and also the third and the fourth layers are divided by 3 nm Si, while the second and the third layers of Ge are divided by 5 nm of Si. For comparison a sample not containing Ge was grown in the same conditions. During changes in the temperature spectra it was discovered that for both samples the maxima were observed in the range of 20 K, while for Ge QD there was one more maximum within the range of 30...40 K. The position of the first peak, unlike that of the second one, did not change with varying of applied voltage. The first peak is bound with the impurity level, and other peak — with the level of electrons in the zone of Si conductivity on the border with QD.

## Volt-ampere characteristics

Development of fiber-optical communication networks encouraged development of effective optoelectronic components (photodetectors and light-emitting structures of the near-field IR-area of the spectrum). In [18–23]  $p$ - $i$ - $n$ -photodiodes on the basis of multilayer structures of Ge/Si with Ge QD were investigated. The dark volt-ampere characteristics of the structures (VAC) were obtained. Fig. 9 presents VAC of a typical diode.

Fig. 10 presents VAC obtained in [23] for three samples: A, B, and C, at 77 K. The thicknesses of the space layers were 20, 20 and 50 nm, the doping levels of Ge —  $6 \cdot 10^{18}$ ,  $0,6 \cdot 10^{18}$  and  $6 \cdot 10^{18}$  cm $^{-3}$  for samples A, B, and C, accordingly.

Comparing the results for samples A and C one can notice that with an increase in the thickness of a spacer layer the dark current decreases. This is mainly due to lessening of the electric field. Comparing the results for samples A and B, it is possible to see, that with a 10-times increase of the doping level the value of the dark current increases by 4...5 orders. This is partly due to a bigger density of the charge carriers. Besides, the energy of Fermi level increases because of doping [22].

For comparison with the structures containing the quantum dots, fig. 11 presents the dark VAC of the silicon photo-electric converters on the basis of the  $p$ - $i$ - $n$ -structures investigated in [24], measured within the range of temperatures from 0...100 °C.

Analysis of the direct branches of dark VAC shows that with the rise of the temperature the voltage of a cutoff decreases from about 1,9 V at 0 °C down to 0,4 V at 100 °C [24].

Thus, the review suggests a conclusion that the energy of activation of the emission of holes from QD in the investigated one-layer Si/Ge structures (Schottky diodes) obtained by the methods of deep level transient spectroscopy and temperature spectroscopy of conductivity is within the limits of 200–700 meV.

From a practical point of view, for the solar elements most important is research of VAC, because on its basis the efficiency of transformation of an element, and degree of the influence of a parasitic resistance can be defined.

## Conclusion

The work contains a review of the electronic structure and electrophysical properties of the materials based on Ge/Si nanoheterostructures with Ge QD, and a review of the methods for measurement of the electrophysical parameters of the semiconductor nanoheterostructures with QD. There are several methods of electric spectroscopy, the main role in which is played by the capture and emission of the charge carriers. Among them are the method of capacity-voltage characteris-

tics, spectroscopy of full conductivity (admittance) (admittance spectroscopy), and deep level transient spectroscopy (DLTS). By measuring the capacity at different shift voltages it is possible to receive information about the concentration of carriers in a sample, about the charge accumulated in QD, and about the density of states. Measurements of a complex conductivity (admittance) of the silicon Schottky barriers with a buried Ge QD layer allow us to receive additional information on the structure of the energy spectrum of the quantum dots and the parameters of the hole states. The method of the temperature spectroscopy of conductivity records the active part of admittance (conductivity) as a temperature function. The temperature scanning of conductivity of a sample is carried out at various frequencies of  $\omega$  test signal, which ensures different dynamic states of the emission of carriers from a deep level or mass of QD. Further, by construction of Arrhenius plot in coordinates  $\omega = f(1/T)$  for positions of the temperature maxima of the spectra of conductivity we define the energy of activation characterizing the position of the quantization levels in QD. Measurements of dark VAC allow us to estimate the level of a dark current in the semi-conductor *p-i-n*-photodiodes with embedded QD layers.

*The research was implemented with the financial support of RFFI within the framework of the scientific project Siber № 13-07-98023.*

#### References

1. **Shklyayev A. A., Ichikava M.** Predelno plotnyie massiviy nanostruktur germaniya i kremniya. *Uspehi fizicheskikh nauk*. 2008. V. 178, N. 2. P. 139–169.
2. **Voytsehovskiy A. V., Kulchitskiy N. A., Melnikov A. A., Nesmelov S. N., Kohanenko A. P., Lozovoy K. A.** Osobennosti sozdaniya kremniy-germanievyyih nanostruktur s kvantovymi tochkami dlya perspektivnyih priborov mikro- i optoelektroniki. *Nanoizheneriya*. 2014. N. 6. P. 3–20.
3. **Voytsehovskiy A. V., Kulchitskiy N. A., Melnikov A. A., Nesmelov S. N., Kohanenko A. P., Lozovoy K. A.** Tehnologiya sozdaniya struktur s kvantovymi tochkami Ge/Si molekulyarno-luchevoy epitaksii. *Nano- i mikrosistemnaya tehnika*. 2014. N. 9. P. 20–31.
4. **Egorov V. A., Tsyirlm G. R., Tonkih A. A., Talalae V. G., Makarov A. G., Ledentsov N. N., Ustinov V. M., Zakharov N. D., Werner P.** Si/Ge nanostruktur dlya primeneniya v optoelektronike. *FTT*. 2004. V. 46, N. 1. P. 53–59.
5. **Voytsehovskiy A. V., Kohanenko A. P., Lozovoy K. A., Turapin A. M., Romanov I. S.** Fotochuvstvitelnyie strukturyi na osnove nanoheterostruktur Si/Ge dlya opticheskikh sistem peredachi informatsii. *Uspehi prikladnoy fiziki*. 2013. V. 1, N. 3. P. 338–343.
6. **Pchelyakov O. P., Bolhovityanov Yu. B., Dvurechenskiy A. V., Sokolov L. V., Nikiforov A. I., Foyhtlender B.** Kremniy-germanievyye nanostruktur dlya kvantovymi tochkami: mehanizmy obrazovaniya i elektricheskie svoystva. *FTP*. 2000. V. 34, N. 11. P. 1281–1299.
7. **Aleshkin V. Ya., Bekin N. A., Buyanova M. N., Zvonkov B. N., Murel A. V.** Opredelenie plotnosti sostoyaniy v kvan-

tovyih yamah i ansamblyah kvantovyyih toчек volt-faradnyim metodom. *FTP*. 1999. V. 33, N. 10. P. 1246–1252.

8. **Yakimov A. I., Dvurechenskiy A. V., Nikiforov A. I., Pchelyakov O. P.** Formirovanie nul-mernyyih dyirochnyyih sostoyaniy pri molekulyarno-luchevoy epitaksii Ge na Si(100). *Pisma v ZhETF*. 1998. V. 68, N. 2. P. 125–130.
9. **Zubkov V. I.** Spektroskopiya admittantsa — effektivnyy metod diagnostiki poluprovodnikovyyih struktur. *Prilozhenie k zhurnalu "Vestnik RGRTU"*. 2009. N. 4.
10. **Zubkov V. I.** Diagnostika poluprovodnikovyyih nanoheterostruktur metodami spektroskopii admittantsa. SPb.: OOO "Tehnimedia". Izd-vo "Elmor", 2007. 220 p.
11. **Feklisova O. V., Yakimov E. B., Arapkina L. V., Chapnin V. A., Chizh K. V., Kalinushkin V. P., Yuryev V. A.** Capacitance investigation of Ge nanoclusters on a silicon (001) surface grown by MBE at low temperatures. *Physica B: Condensed matter. Proceedings of the 25th International Conference on Defects in Semiconductors ICDS-24*. 2009. V. 404, N. 23–24. P. 4705–4707.
12. **Yakimov A. I., Dvurechenskiy A. V., Nikiforov A. I., Mikhalev G. Yu.** Pravilo Meyera-Neldelya v protsessah termomissii i zahvata dyirok v kvantovyyih tochkah Ge/Si. *Pisma v ZhETF*. 2004. V. 80, N. 5. P. 367–371.
13. **Zubkov V. I., Kapteyn C. M. A., Solomonov A. V., Bimberg D.** Voltage-capacitance and admittance investigations of electron states in self-organized InAs/GaAs quantum dots. *J. of Physics: Condens. Matter*. 2005. V. 17. P. 2435.
14. **Volodin V. A., Yakimov A. I., Dvurechenskiy A. V., Efremov M. D., Nikiforov A. I., Gatskevich E. I., Ivlev G. D., Mikhalev G. Yu.** Modifikatsiya kvantovyyih toчек v nanostrukturah Cie/Si impulsnyim lazernym oblucheniem. *FTP*. 2006. V. 40, N. 2. P. 207–214.
15. **Yakimov A. I., Dvurechenskii A. V., Nikiforov A. I., Bloshekin A. A., Nenashev A. V., Volodin V. A.** Electronic states in Ge/Si quantum dots with type-II band alignment initiated by space-charge spectroscopy. *Physical Review B*. 2006. V. 73. P. 115333.
16. **Asperger T., Miesner C., Brunner K., Abstreiter G.** Admittance spectroscopy of Ge quantum dots in Si. *Thin Solid Films*. 2000. V. 380. P. 227–229.
17. **Miesner C., Asperger T., Brunner K., Abstreiter G.** Capacitance-voltage and admittance spectroscopy of self-assembled Ge islands in Si. *Applied Physics Letters*. 2000. V. 77, N. 17. P. 2704–2706.
18. **Yakimov A. I., Dvurechenskii A. V., Nikiforov A. I., Proskuryakov Yu. Yu.** Interlevel Ge/Si quantum dot infrared photodetector. *Journal of Applied Physics*. 2001. V. 89, N. 10. P. 5676–5681.
19. **Yakimov A. I., Dvurechenskiy A. V., Nikiforov A. I., Chaikovskii S. V., Teys S. A.** Fotodiody Ge/Si so vstroennymi sloyami kvantovyyih toчек Ge dlya blizhney infrakrasnoy oblasti (1,3–1,5 mkm). *FTP*. 2003. V. 37, N. 11. P. 1383–1388.
20. **Colase L., Assanto G.** Ge-on-Si photodetectors for optical receivers. *International journal of microwave and optical technology*. 2008. V. 3, N. 3. P. 404–411.
21. **Hsu B. C., Lin C. H., Kuo P. S., Chang S. T., Chen P. S., Liu C. W., Lu J.-H., Kuan C. H.** Novel MIS Ge-Si quantum-dot infrared photodetectors. *IEEE electron device letters*. 2004. V. 25, N. 8. P. 544–546.
22. **Tong S., Liu J. L., Wan J., Wang K. L.** Normal-incidence Ge quantum-dot photodetectors at 1,5  $\mu\text{m}$  based on Si substrate. *Applied physics letters*. 2002. V. 80, N. 7. P. 1189–1191.
23. **Wang K. L., Cha D., Liu J., Chen C.** Ge/Si self-assembled quantum dots and their optoelectronic device applications. *Proceedings of the IEEE*. 2007. V. 95, N. 9. P. 1866–1883.
24. **Kurak V. V., Tsybulenko V. V., Agbomassu V. L.** Tehnologicheskii aspekt povysheniya effektivnosti poluprovodnikovyyih fotoelektricheskikh preobrazovateley. *Tehnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*. 2002. N. 6. P. 26–29.