

# Электрофизические свойства структур металл–диэлектрик–полупроводник на основе $n$ -GaAs с квантовыми точками InAs, выращенными на поверхности слоя $n$ -GaAs

© С.В. Тихов, О.Н. Горшков, М.Н. Коряжкина, А.П. Касаткин, И.Н. Антонов, О.В. Вихрова, А.И. Морозов

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603095 Нижний Новгород, Россия

E-mail: mahavenok@mail.ru

(Получена 27 апреля 2016 г. Принята к печати 10 мая 2016 г.)

Изучены свойства МДП-структур на основе  $n$ -GaAs, в которых в качестве диэлектрика использованы оксид кремния и стабилизированные оксидом иттрия диоксид циркония и диоксид гафния, и которые содержали квантовые точки InAs, встроенные на границе раздела диэлектрик/ $n$ -GaAs. Структуры проявляли резистивное переключение и синаптическое поведение

## 1. Введение

Резистивная память с произвольным доступом (англ.: Resistive Random Access Memory (RRAM)) [1] — новое поколение энергонезависимой памяти, основанное на использовании элементов памяти с двумя устойчивыми состояниями диэлектрика (другое название — мемристивные структуры [2]): состояния с высоким сопротивлением (СВС) и состояния с низким сопротивлением (СНС), переключение между которыми осуществляется путем приложения внешнего напряжения к структуре металл–диэлектрик–металл (МДМ). К настоящему времени достигнуты определенные успехи в направлении коммерциализации приборов RRAM [1]. Другое важное направление применения мемристивных структур обусловлено их способностью (по аналогии с биологическим синапсом) непрерывным образом менять сопротивление в зависимости от подаваемого на него электрического сигнала, в связи с чем такой элемент рассматривается как основа нового поколения электронных синаптических устройств, призванных имитировать адаптивное поведение биологических систем [3]. Наряду с резистивным переключением в МДМ-структурах этот эффект изучается также в  $p$ – $n$ -переходах [4] и структурах металл–диэлектрик–полупроводник (МДП) [5,6], что повышает функциональность мемристивных приборов. В частности, в работе [6] показано, что МДП-структуры могут проявлять стимулированное светом резистивное переключение в результате процессов, происходящих в полупроводнике.

Квантовые точки (англ.: quantum dots (QD)) из InAs, выращенные на поверхности эпитаксиального слоя  $n$ -GaAs, имеют размеры и плотность [7,8], позволяющие использовать их в качестве концентраторов электрического поля в МДП-структурах для реализации эффекта резистивного переключения в диэлектрике.

В настоящей работе исследовано поведение МДП-структур на основе  $n$ -GaAs с QD, сформированными на границе раздела (ГР) диэлектрик/полупроводник (Д/П), с оксидом кремния и стабилизированными оксидом иттрия (12 мол%) диоксидом циркония (англ.: yttria-stabilized zirconia) (YSZ) и диоксидом гафния (англ.: yttria-stabilized hafnia) (YSH) в качестве диэлектрика.

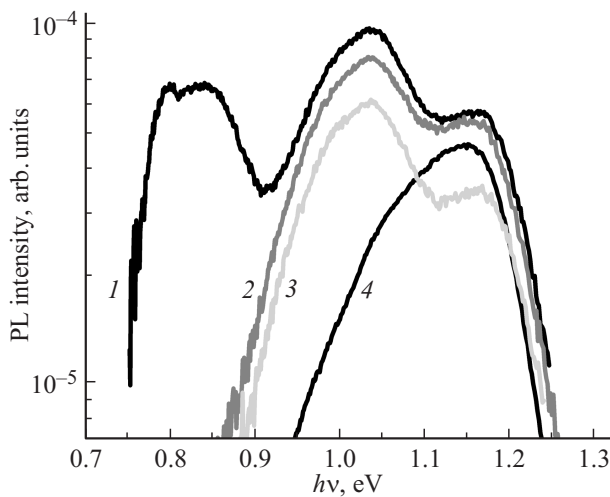
## 2. Методика эксперимента

МДП-структуры были сформированы на основе монокристаллических пластин  $n^+$ -GaAs с ориентацией (100) со слоями  $n$ -GaAs с равновесной концентрацией электронов  $n_0$ , равной  $5.2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , и QD InAs на поверхности этих слоев, полученных методом МОС-гидридной эпитаксии. Квантовые точки были образованы из пяти монослоев InAs. Пленки SiO<sub>x</sub>, YSZ и YSH были сформированы магнетронным методом при температуре подложки 473 К на поверхности, покрытой QD. Толщина диэлектрических слоев составляла 40 нм. Управляющий прозрачный для света металлический электрод из Au (толщиной 20 нм) с подслоем Zr (толщиной 3 нм) для улучшения адгезии был сформирован одновременно на поверхность, покрытую как QD, так и диэлектриками. Таким образом, были получены барьеры Шоттки (БШ) и МДП-структуры на одной подложке полупроводника. Их площадь составляла  $\sim 1.0 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$ .

На полученных структурах измерялись морфология поверхности, покрытой QD, с помощью атомно-силового микроскопа и спектры фотолюминесценции (ФЛ) при 77 К по методике [9,10]. Для БШ и МДП-структур измерялись зависимости сильносигнальной фотоздс  $V_f$  от интенсивности потока фотонов  $N_f$  с максимумом излучения на длине волны 0.5 мкм по методике [11], а также вольт-фарадные, вольт-сименсные и вольт-амперные характеристики в интервале напряжений от  $-16$  до  $+6$  В и зависимости параметров малосигнальной эквивалентной схемы от частоты  $f$  в интервале  $10^3$ – $2 \cdot 10^6$  Гц и температуры  $T$  в интервале 77–500 К. Последние измерения проводились в автоматическом режиме на анализаторе параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500A. Напряжение на структуре соответствовало потенциалу верхнего электрода относительно потенциала подложки.

## 3. Экспериментальные результаты

Морфология покрытой QD поверхности слоя  $n$ -GaAs была получена с помощью атомно-силового микроскопа.



**Рис. 1.** Зависимости интенсивности ФЛ от энергии квантов  $h\nu$  для структур: 1 — QD/ $n$ -GaAs/ $n^+$ -GaAs, 2 — SiO<sub>x</sub>/QD/ $n$ -GaAs/ $n^+$ -GaAs, 3 — YSH/QD/ $n$ -GaAs/ $n^+$ -GaAs, 4 —  $n^+$ -GaAs.

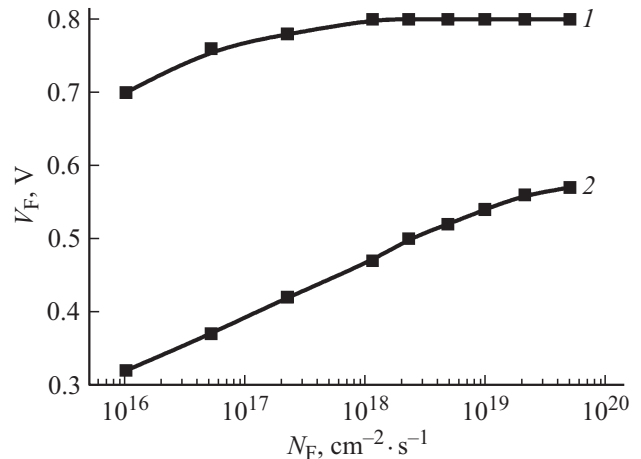
Анализ показал, что она содержала в основном два типа неровностей, которые были отнесены к QD. Одни имели среднюю высоту около 6 нм, латеральный размер у основания 40 нм и плотность около  $4.0 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ , вторые — меньшую плотность (около  $9.0 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ ), но бóльшие размеры у основания (до 100 нм) и высоту (до 20 нм). Последние неровности всегда имеются в общем массиве QD при отсутствии легирования висмутом [9]. Их происхождение связывается с образованием дислоцированных кластеров при нанесении слоя InAs.

Анализ данных по зависимости интенсивности ФЛ структур от энергии квантов, приведенных на рис. 1, показал, что спектры ФЛ при 77 К обнаруживали отклик от QD при энергиях 0.80, 0.84 и 1.04 эВ на свободной поверхности  $n$ -GaAs. На покрытой диэлектриками поверхности сохранялся отклик при энергии 1.04 эВ, что свидетельствовало о сохранении QD. Этот уровень, вероятно, относился к мелким QD с наименьшими геометрическими размерами (первый тип неровностей). Отклик от массива QD с большими геометрическими размерами (второй тип неровностей — 0.80, 0.84 эВ) не был выявлен в покрытых диэлектриком поверхностях, по-видимому, из-за высокого уровня безызлучательной рекомбинации в этой области. Отклик при 1.15 эВ был отнесен к подложке, поскольку он соответствовал отклику от тыльной стороны подложки.

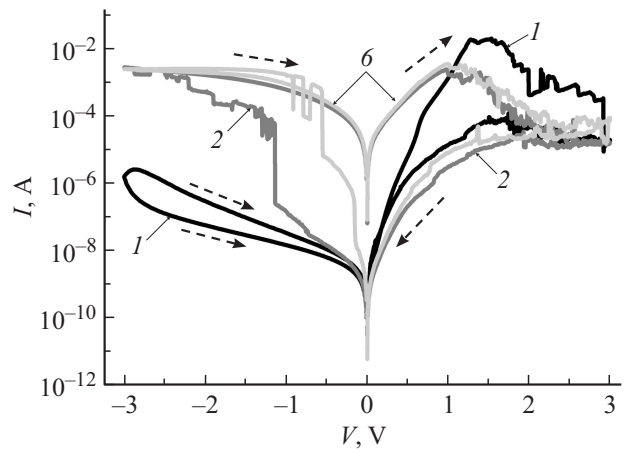
На рис. 2 приведены зависимости барьерной фотоэдс от интенсивности потока фотонов для ДШ Au/Zr/ $n$ -GaAs/ $n^+$ -GaAs (1) и Au/Zr/QD/ $n$ -GaAs/ $n^+$ -GaAs (2). Видно, что величина фотоэдс  $V_f$  насыщалась при высоких уровнях фотовозбуждения и составляла 0.80 В для структуры Au/Zr/ $n$ -GaAs/ $n^+$ -GaAs и 0.57 В для структуры Au/Zr/QD/ $n$ -GaAs/ $n^+$ -GaAs. Для МДП-структур Au/Zr/SiO<sub>x</sub>/QD/ $n$ -GaAs/ $n^+$ -GaAs  $V_f$  составляла 0.15 В, для Au/Zr/YSH/QD/ $n$ -GaAs/ $n^+$ -GaAs — 0.4 В и для Au/Zr/YSH/QD/ $n$ -GaAs/ $n^+$ -GaAs — 0.43 В. Известно, что

фотоэдс насыщения на одиночном барьере равна величине его темнового поверхностного потенциала  $\phi_s$  [11]. Таким образом, можно считать, что в исследованных структурах с QD происходило открепление уровня Ферми на поверхности  $n$ -GaAs и изменение поверхностного потенциала на значительную величину подобно тому, как это происходит при пассивации поверхности халькогенидами [12] или нанослоями InP [13] и InGaAs [14]. В МДП-структурах Au/Zr/SiO<sub>x</sub>/QD/ $n$ -GaAs/ $n^+$ -GaAs  $\phi_s$  составляла  $-0.15$  В и это позволяло изменять величину электрического поля в диэлектрике, даже с учетом некоторого падения напряжения на области пространственного заряда полупроводника, до величины, достаточной для возникновения явления формовки в диэлектрике и последующего переключения его сопротивления.

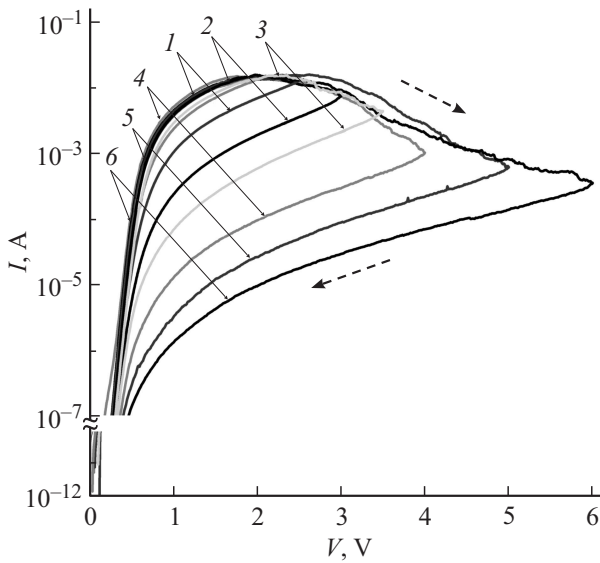
На рис. 3 приведены вольт-амперные характеристики (ВАХ), демонстрирующие биполярное резистивное переключение. Пунктирными стрелками на ВАХ отмечено



**Рис. 2.** Зависимости  $V_f$  от  $N_F$  для диодов Шоттки: 1 — Au/Zr/ $n$ -GaAs/ $n^+$ -GaAs, 2 — Au/Zr/QD/ $n$ -GaAs/ $n^+$ -GaAs.



**Рис. 3.** Вольт-амперные характеристики структуры Au/Zr/SiO<sub>x</sub>/QD/ $n$ -GaAs/ $n^+$ -GaAs, демонстрирующие процесс резистивного переключения: 1 — первое переключение; 2, 6 — номера последующих переключений. Скорость развертки по напряжению 0.20 В/с. Пунктирными стрелками показано направление развертки по напряжению.



**Рис. 4.** Вольт-амперные характеристики структуры Au/Zr/YSH/QD/n-GaAs/n<sup>+</sup>-GaAs, иллюстрирующие влияние величины электрического поля на их гистерезис. Измерению кривых 1–6 предшествовала подача отрицательного напряжения с амплитудой –16 В и скоростью развертки по напряжению 0.60 В/с. Скорость развертки по напряжению: 1 — 0.084 В/с (при амплитуде напряжения 2 В), 2 — 0.109 В/с (при амплитуде напряжения 2.5 В), 3 — 0.130 В/с (при амплитуде напряжения 3 В), 4 — 0.174 В/с (при амплитуде напряжения 4 В), 5 — 0.217 В/с (при амплитуде напряжения 5 В), 6 — 0.270 В/с (при амплитуде напряжения 6 В). Пунктирными стрелками показано направление развертки по напряжению.

направление обхода петли гистерезиса, соответствующее достижению СНС при  $V < 0$  и СВС при  $V > 0$ .

Механизм такого переключения был объяснен образованием проводящих шнуров (англ.: filaments) в диэлектрике [15], проходящих через ионные мостики, выстраиваемые в области концентраторов электрического поля, образованных QD. При отсутствии QD в структурах с SiO<sub>x</sub> формовка и резистивное переключение не наблюдались. Следует считать, что при  $V < 0$  ионные мостики соединяли верхний (Au) электрод с QD на полупроводниковой обкладке. При этом происходило закорачивание МДП-структуры путем электронного переноса тока через ионные мостики и достигалось СНС. При  $V > 0$  ионы кислорода притягивались к верхнему электроду, а электронная проводимость прерывалась, и достигалось СВС. МДП-структуры Au/Zr/YSZ/QD/n-GaAs/n<sup>+</sup>-GaAs и Au/Zr/YSH/QD/n-GaAs/n<sup>+</sup>-GaAs также испытывали аналогичные резистивные переключения, но эти переключения происходили при больших напряжениях. Этот факт можно объяснить большей долей падения напряжения на полупроводнике.

На рис. 4 приведены ВАХ МДП-структуры Au/Zr/YSH/QD/n-GaAs/n<sup>+</sup>-GaAs, иллюстрирующие ее синаптическое поведение. Следует отметить, что в отличие от структур Au/Zr/SiO<sub>x</sub>/QD/n-GaAs/n<sup>+</sup>-GaAs (см. рис. 3) структуры Au/Zr/YSH/QD/n-GaAs/n<sup>+</sup>-GaAs не требовали

проведения процесса формовки. Каждой кривой переключения ВАХ при  $V > 0$ , показанной на рис. 4, предшествовало измерение ВАХ при  $V < 0$  с амплитудой –16 В (на рисунке не показаны). Скорость развертки по напряжению при  $V < 0$  составляла 0.60 В/с, а при  $V > 0$  варьировалась от 0.084 В/с (при амплитуде напряжения 2 В) до 0.270 В/с (при амплитуде напряжения 6 В) таким образом, чтобы время измерения каждой кривой оставалось примерно постоянным (среднее время измерения ~ 23 с). Данные, показанные на рис. 4, иллюстрируют влияние величины электрического поля на гистерезис ВАХ при  $V > 0$ . Отметим, что при  $V < 0$  гистерезис был незначительным и изменения его от цикла к циклу были малы.

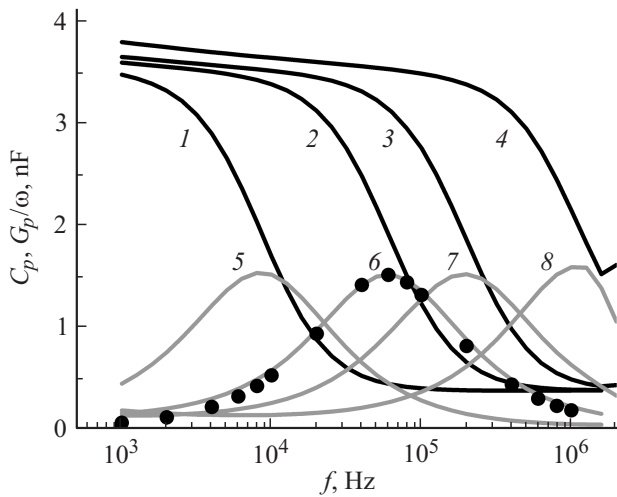
Из этих данных следует, что, изменяя величину электрического поля, можно плавно менять величину гистерезиса. Такое поведение мемристивной структуры аналогично изменению пропускной способности биологического синапса и рассматривается в качестве одного из главных условий для применения мемристивных структур в нейроморфных системах и элементной базе синаптической электроники [16,17]. Подобное поведение наблюдалось в МДП-структурах с SiO<sub>x</sub> и с YSZ, а также в МДМ-структурах на основе SiO<sub>x</sub>, исследованных в работе [5].

Как показали измерения вольт-фарадных характеристик, в исследованных МДП-структурах с SiO<sub>x</sub> при формовке происходило уменьшение встроенного положительного заряда у полупроводниковой обкладки, соответствующее плотности ~ 1.0 · 10<sup>12</sup> см<sup>-2</sup>. При переключении в СВС, наоборот, происходило увеличение этого заряда до исходной величины. Следует считать, что в формировании ионных мостиков участвовали положительные заряженные вакансии кислорода, концентрация которых велика в использованных диэлектрических пленках.

В табл. 1 приведены некоторые параметры диэлектриков и малосигнальной схемы МДП-структур в СНС и СВС. Приведены эффективные значения относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ , тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta$ , параллельного  $R_p$  и последовательного  $R_s$  дифференциальных сопротивлений, определенных в случае использования параллельной и последовательной схемы замещения конденсатора, соответственно [18]. Индекс 0 относится к частоте 10<sup>3</sup> Гц, а

**Таблица 1.** Параметры диэлектриков и малосигнальной эквивалентной схемы МДП-структур

Состав диэлектрика в МДП-структуре и его состояние		$\epsilon_0$	$\text{tg } \delta_0$	$\text{tg } \delta_\infty$	$R_{p0}, \text{ Ом}$	$R_{s\infty}, \text{ Ом}$
SiO <sub>x</sub>	СНС	7.0	24	0.15	$4.2 \cdot 10^4$	26
	СВС	7.0	0.020	0.12	$4.3 \cdot 10^6$	21
YSZ	СНС	19	3.7	0.55	$9.2 \cdot 10^2$	$1.5 \cdot 10^2$
	СВС	19	0.20	0.12	$1.6 \cdot 10^5$	48



**Рис. 5.** Частотные зависимости  $C_p$  (1–6) и  $G_p/\omega$  (7–12) для МДП-структуры Au/Zr/YSZ/QD/n-GaAs/n<sup>+</sup>-GaAs, измеренные при  $V = 0$  и температурах  $T, K$ : 1,5 — 297; 2,6 — 342; 3,7 — 375; 4,8 — 437. Теоретически полученные зависимости в случае моноуровня поверхностных состояний показаны точками.

$\infty$  — к  $10^6$  Гц. Величина  $R_{p0}$  характеризует суммарное параллельное сопротивление диэлектрика и полупроводника, а  $R_{s\infty}$  — сопротивление полупроводниковой обкладки.

Как видно из таблицы, значения  $\epsilon_0$  не зависели от состояния МДП-структуры и определялись диэлектрической проницаемостью диэлектриков. Для оксида кремния эти значения близки к значениям для SiO [19,20] из-за наличия вакансий кислорода (избыточных атомов кремния). Значения  $\epsilon_0$  в структурах с YSZ и YSH соответствовали литературным данным [21]. В СНС было обнаружено появление больших омических потерь, обусловленное протеканием тока через проводящие шнуры, увеличение сопротивления полупроводниковой обкладки и уменьшение параллельного сопротивления. В СВС наблюдались противоположные изменения, что хорошо соответствовало ранее отмеченным изменениям, происходящим при переходе в эти состояния. Неизменность значений  $\epsilon_0$  при этом была рассмотрена как доказательство изменений в диэлектрике, затрагивающих очень ограниченный объем и выражающихся в возникновении в диэлектрике проводящих шнуров.

На рис. 5 показаны зависимости емкости  $C_p$  и приведенной к круговой частоте проводимости  $G_p/\omega$  в параллельной эквивалентной схеме замещения МДП-конденсатора [18] от частоты и от температуры для МДП-структуры Au/Zr/YSZ/QD/n-GaAs/n<sup>+</sup>-GaAs при  $V = 0$ . Качественно похожие кривые получены для МДП-структур Au/Zr/SiO<sub>x</sub>/QD/n-GaAs/n<sup>+</sup>-GaAs и Au/Zr/YSH/QD/n-GaAs/n<sup>+</sup>-GaAs. Наблюдающиеся релаксационные кривые были объяснены влиянием захвата на поверхностные состояния (ПС), а выход на мало меняющуюся емкость и проводимость на низких частотах наблюдался, когда емкость ПС оказывалась значительно

больше емкости диэлектрика. В этом случае полная емкость и проводимость МДП-структуры определялась свойствами диэлектрика. Было установлено, что во всех исследованных структурах с QD экспериментальные зависимости  $G_p/\omega$  от частоты описывались релаксацией с участием моноуровня ПС [18] (см., например, теоретически рассчитанную зависимость, показанную точками на рис. 5).

Времена релаксации, определенные по частоте максимума  $f_m$

$$\tau = 1/(2\pi f_m), \tag{1}$$

экспоненциально уменьшались с ростом температуры, что также характерно для релаксаций в случае захвата и эмиссии электрона с моноуровня ПС. Таким образом, плотность ловушек  $N_{t0}$  была определена по значению  $G_p/\omega$  в максимуме по формуле [18]

$$2G_p/\omega = q^2 N_{t0}/(2kT), \tag{2}$$

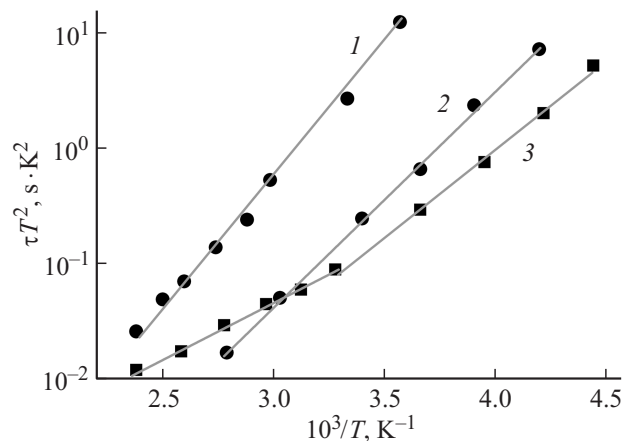
где  $q$  — заряд электрона,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура.

В предположении основного вклада в значение  $\tau$  эмиссии, что характерно для обедненных основными носителями (в нашем случае электронами) поверхностей полупроводника, по температурной зависимости  $\tau$ , согласно [22], из выражения

$$\ln(\tau T^2) = -\ln(\sigma_n b_n) + (E_c - E_t)/(kT), \tag{3}$$

где  $\sigma_n$  — сечение захвата электрона ловушкой,  $E_c$  — энергия дна зоны проводимости,  $E_t$  — энергия поверхностного уровня, совпадающего с уровнем Ферми на поверхности Si,  $b_n = u_n N_c / T^2$ , причем  $u_n$  — тепловая скорость,  $N_c$  — плотность состояний в зоне проводимости, были определены значения  $E_t$  и  $\sigma_n$ , пренебрегая температурной зависимостью сечения захвата  $\sigma_n$  электрона. При этом для GaAs было использовано значение  $b_n = 2.2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{K}^{-2}$  [22].

На рис. 6 показаны зависимости  $\lg(\tau T^2)$  от  $10^3/T$  для МДП-структуры Au/Zr/YSZ/QD/n-GaAs/n<sup>+</sup>-GaAs. Видно, что они имели вид прямых линий, наклон которых зависел от величины напряжения. Этот результат



**Рис. 6.** Зависимости  $(\tau T^2)$  от  $10^3/T$  для МДП-структуры Au/Zr/YSZ/QD/n-GaAs/n<sup>+</sup>-GaAs, полученные при  $V, B$ : 1 — 4, 2 — 0, 3 — 1.

**Таблица 2.** Параметры поверхностных состояний в МДП-структурах и барьерах Шоттки с квантовыми точками

Состав диэлектрика	$N_t \cdot 10^{-11}, \text{см}^{-2}$	$E_t, \text{эВ}$	$\sigma_n, \text{см}^2$
SiO <sub>x</sub>	4.2	0.38	$4.5 \cdot 10^{-15}$
	3.2	0.22	$6.4 \cdot 10^{-16}$
	3.5	0.38	$4.5 \cdot 10^{-14}$
YSZ		0.30	$5.6 \cdot 10^{-15}$
	1.7	0.18	$5.6 \cdot 10^{-16}$
	11	0.46	$4.5 \cdot 10^{-14}$
YSH	3.9	0.44	$4.4 \cdot 10^{-14}$
	3.2	0.28	$1.3 \cdot 10^{-15}$
	3.7	0.17	$4.5 \cdot 10^{-17}$

подтверждал открепление уровня Ферми в структуре Au/Zr/YSZ/QD/*n*-GaAs/*n*<sup>+</sup>GaAs и его перемещение в зависимости от внешнего напряжения по запрещенной зоне полупроводника на ГР Д/П. Таким образом, различный наклон зависимостей, показанных на рис. 6, соответствовал различным моноуровням ПС на этой ГР. Качественно аналогичные зависимости были получены для МДП-структур с SiO<sub>x</sub> и YSH. Отметим, что на ГР диэлектрик/GaAs с закрепленным в точке электронейтральности  $E_c - (0.8-0.9)$  эВ уровнем Ферми обычно наблюдается квазинепрерывный спектр ПС [14].

Параметры ПС, которые тестируются в исследованных структурах, приведены в табл. 2. Таким образом, формирование различных диэлектрических слоев оказывало разное влияние на параметры ловушек в МДП-структурах.

#### 4. Заключение

Показано, что квантовые точки из InAs изменяли изгиб зон на поверхности *n*-GaAs в барьерах Шоттки и МДП-структурах и активировали резистивное переключение в диэлектрике в МДП-структурах. Определены параметры поверхностных состояний, создаваемых формированием квантовых точек, встроенных на границах раздела SiO<sub>x</sub>/*n*-GaAs, YSZ/*n*-GaAs и YSH/*n*-GaAs.

Авторы выражают благодарность Б.Н. Звонкову за создание полупроводниковых структур. Работа поддержана Министерством образования и науки России в рамках государственного задания № 2014/134 (код проекта 2591).

#### Список литературы

- [1] J.S. Lee, S. Lee, T.W. Noh. Appl. Phys. Rev., **2**, 031303 (2015).
- [2] A. Adamatzky, L. Chua. Memristor Networks. Ed. (Springer International Publishing Switzerland, 2014).
- [3] W. Cai, R. Tetzlaff. In: Memristor Networks., eds A. Adamatzky, L. Chua Springer International Publishing Switzerland, 2014) P. 113.

- [4] A. Bogusz, D. Blaschke, B. Abendroth, I. Skorupa, D. Bürger, O.G. Schmidt, H. Schmidt. 80. Jahrestagung der DPG und DPG-Frühjahrstagung. Regensburg, 6.–11. März 2016 (A. Bogusz et al., AIP Advances 4 (2014), A. Bogusz et al., Adv. Mater. Res. 1101 (2015).).
- [5] С.В. Тихов, О.Н. Горшков, И.Н. Антонов, А.П. Касаткин, М.Н. Коряжкина. Письма в ЖТФ, **40** (19), 18 (2014).
- [6] С.В. Тихов, О.Н. Горшков, М.Н. Коряжкина, И.Н. Антонов, А.П. Касаткин. Письма ЖТФ, **42** (10), 78 (2016).
- [7] Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, В.А. Шукин, П.С. Копьев, Ж.И. Алфёров, Д. Бимберг. ФТП, **32** (4), 385 (1998).
- [8] С.В. Тихов. ФТП, **46** (10), 1297 (2012).
- [9] Б.Н. Звонков, И.А. Карпович, Н.В. Байдусь, Д.О. Филатов, С.В. Морозов. ФТП, **35** (1), 92 (2001).
- [10] Б.Н. Звонков, И.Г. Малкина, Е.Р. Линькова, В.Я. Алешкин, И.А. Карпович, Д.О. Филатов. ФТП, **31** (9) 1100 (1997).
- [11] С.В. Тихов. ФТП, **29** (4), 742 (1995).
- [12] В.Н. Бессолов, М.В. Лебедев. ФТП, **32** (11), 1281 (1998).
- [13] S. Kundu, N.N. Halder, D. Biswas, P. Banerji, T. Shripathi, S. Chakraborty. J. Appl. Phys., **112**, 034514-1 (2012).
- [14] J. Robertson, Y. Guo, L. Lin. J. Appl. Phys., **117**, 112806 (2015).
- [15] D. Kuzum, S. Yu, H. Wong. Nanotechnology, **24**, 382001 (2013).
- [16] A. Thomas. J. Phys. D: Appl. Phys., **46**, 093001 (2013).
- [17] A.N. Mikhaylov, A.I. Belov, D.V. Guseinov, D.S. Korolev, I.N. Antonov, D.V. Efimovych, S.V. Tikhov, A.P. Kasatkin, O.N. Gorshkov, D.I. Tetelbaum, A.I. Bobrov, N.V. Malekhonova, D.A. Pavlov, E.G. Gryaznov, A.P. Yatmanov. Mater. Sci. Eng. B, **194**, 48 (2015).
- [18] В.Н. Овсяк. *Электронные процессы в полупроводниках с областями пространственного заряда* (Новосибирск, Наука: Сиб. отд-ние, 1984).
- [19] Т.И. Данилина. *Технология тонкопленочных микросхем* (Томск, ТУСУР 2006).
- [20] В.А. Грищенко, И.Е. Тыщенко, В.П. Попов, Т.В. Перевалов. *Диэлектрики в нанозлектронике* (Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2010).
- [21] G.D. Wilk, R.M. Wallace, J.M. Anthony. J. Appl. Phys., **89** (10), 5243 (2001).
- [22] Л.С. Берман, А.А. Лебедев. *Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках* (Л., Наука: Ленингр. отд., 1981).

Редактор Г.А. Оганесян

#### Electrical properties of metal–insulator–semiconductor structures based on *n*-GaAs with InAs quantum dots deposited on the surface of the *n*-GaAs layer

S.V. Tikhov, O.N. Gorshkov, M.N. Koryazhkina, A.P. Kasatkin, I.N. Antonov, O.V. Vihrova, A.I. Morozov

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract** The properties of the MIS-structures with silica, yttria-stabilized zirconia and yttria-stabilized hafnia insulators based on *n*-GaAs containing InAs quantum dots embedded at the insulator/*n*-GaAs interface were studied. The structures showed resistive switching and synaptic behavior.