

УДК 621.315

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ПЕРЕНОСА ЗАРЯДА В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ Me/ZnO/Si

А. Р. Семенов, аспирант кафедры МНЭЛ РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0003-2780-5661, e-mail: sem-a-sem@mail.ru

М. В. Голованова, магистрант кафедры МНЭЛ РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0002-3595-1426, e-mail: golovanova_m_v@rambler.ru

В. Г. Литвинов, к.ф.-м.н., доцент кафедры МНЭЛ РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0001-6122-8525, e-mail: vglit@yandex.ru

Д. Г. Громов, д.т.н., профессор института перспективных материалов и технологий национального исследовательского университета «МИЭТ», Зеленоград, Россия;

orcid.org/0000-0002-4563-9831, e-mail: gromadima@gmail.com

С. П. Олейник, к.ф.-м.н., заведующий кафедрой маркетинга и управления проектами НИУ «МИЭТ», Зеленоград, Россия;

orcid.org/0000-0001-8514-9530, e-mail: 0111959sp@mail.ru

Т. А. Холомина, д.ф.-м.н., заведующий кафедрой МНЭЛ РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0003-3902-618X, e-mail: marta.tap@yandex.ru

А. В. Ермачихин, к.ф.-м.н., доцент кафедры МНЭЛ РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0002-3808-9691, e-mail: al.erm@mail.ru

Рассматриваются результаты исследования механизмов переноса заряда под действием электрического поля в гетероструктурах Me/ZnO/Si методами вольт-амперных и высокочастотных вольт-фарадных характеристик. Полученные результаты свидетельствуют о заметном влиянии ловушечных уровней на электрофизические параметры и энергетическую зонную диаграмму полупроводниковых гетероструктур Me/ZnO/Si. Установлено влияние режима отжига на параметры пленок ZnO, выращенных методом пиролитического разложения. Целью работы явилось исследование механизмов переноса заряда в структурах металл-диэлектрик-полупроводник на основе гетероперехода ZnO/Si и моделирование строения энергетических зонных диаграмм с использованием экспериментальных результатов.

Ключевые слова: механизмы переноса заряда; гетероструктура; зонная диаграмма; вольт-амперная характеристика; вольт-фарадная характеристика.

DOI: 10.21667/1995-4565-2019-70-179-189

Введение

Оксид цинка является перспективным материалом для создания новой элементной базы электроники, оптоэлектроники и солнечной энергетики. Нелегированный материал обладает электронным типом проводимости, широко используемыми функциональными оптическими свойствами в сочетании с устойчивостью к воздействию излучения [1]. Значительная ширина запрещенной зоны (~3,4 эВ) ZnO позволяет использовать материал в оптоэлектронике и так называемой «прозрачной» электронике [2]. На данном этапе развития технологий основным направлением является исследование тонких слоев ZnO, выращенных различными методами на доступных сапфировых или кремниевых подложках.

В настоящей работе представлены результаты исследования механизмов переноса заряда в тонких пленках ZnO, полученных на кремниевой подложке методом пиролитического разложения.

Особенности микроструктуры контактирующих полупроводниковых слоев в гетероструктурах играют значительную роль и определяют особенности процессов переноса заряда, в частности посредством перезарядки дефектов, образующих глубокие энергетические уровни,

локализованные в запрещенной зоне полупроводников. Поэтому тема работы, посвященная теоретическому и экспериментальному исследованию структур металл-диэлектрик-полупроводник на основе гетероперехода ZnO/Si, является актуальной.

Образцы и методы измерения

Пленки оксида цинка синтезировались в результате термодеструкции хелатных комплексов ацетилацетоната цинка $Zn(АсАс)_2$ на кремниевой подложке без использования катализатора путём химического осаждения из газовой фазы при давлении 102 Па в потоке кислорода в реакторе вертикального типа. Температура роста составляла ~ 300 °С, толщина плёнки 700 нм. Выращивание происходило на n^+ кремниевых подложках с концентрацией свободных носителей заряда порядка $4,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (согласно результатам C-V измерений) с последующим нанесением на их поверхности методом термического испарения в вакууме Au контактов круглой формы диаметром 0,85 мм и In контактов квадратной формы со стороной 0,85 мм. На следующем этапе проводился отжиг при 600 °С в атмосферах аргона (партия 1) и кислорода (партии 2-4). На обратной стороне подложки выполнен омический контакт методом термического испарения Al в вакууме. Толщина плёнки контактов составляет 50-100 нм.

Исследование вольт-амперных и высокочастотных вольт-фарадных характеристик (ВФХ) производилось с использованием измерительно-аналитического комплекса на основе криостата замкнутого цикла JanisCCS-400/204N и RLC-метра AgilentE4980A с встроенным источником напряжения (опция 001) [3].

Теоретические и экспериментальные результаты

На рисунке 1 представлены вольт-амперные характеристики (ВАХ), полученные на невыпрямляющих контактах In-подложка. Вольт-амперные характеристики имели практически линейный и симметричный характер. Из ВАХ оценено удельное сопротивление ZnO, которое оказалось не меньше $10^5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ для всех образцов, что позволяет рассматривать оксид цинка в качестве диэлектрика [4]. Сопротивления тонких слоев ZnO, оцененные по ВАХ, составили величины 966 кОм для образцов из партии 1; 395 кОм для партии 2; 1,428 МОм для партии 3 и 1,19 МОм для партии 4.

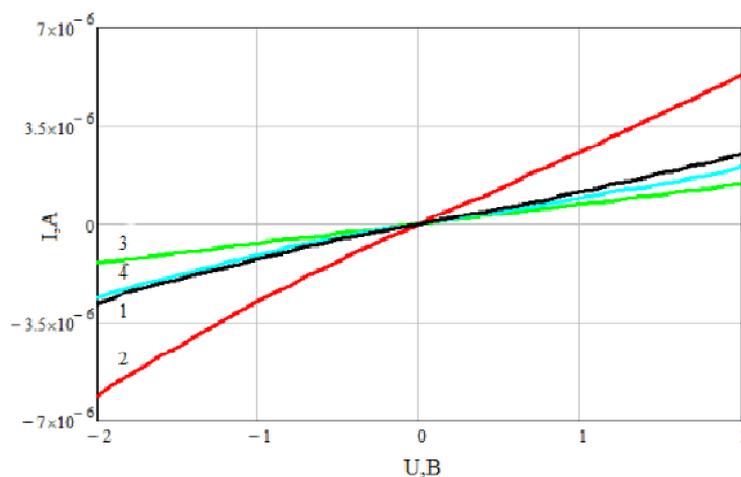


Рисунок 1 – Вольт-амперные характеристики образцов, отожженных в атмосфере аргона (1) и кислорода (2, 3, 4), измеренные на контактах In-подложка
Figure 1 – I-U characteristics for samples annealed in Ar (1) and O (2, 3, 4) measured on In-substrate contacts

ВАХ образцов, измеренные на контактах Au-подложка (положительный потенциал подключался к контакту из золота, отрицательный к подложке), подтвердили наличие выпрямляющих свойств структур, а вид полученных зависимостей был характерен для диода. Для образцов партии 1 был зафиксирован электрический пробой при обратном напряжении сме-

щения $-4,7$ В, в связи с чем вольт-амперные характеристики образцов в дальнейшем измерялись в диапазоне от $-3,5$ до $3,5$ В (рисунок 2).

Наиболее ярко выраженная выпрямляющая ВАХ получена для образцов партии 1, для которых резкий рост прямого тока начинался при напряжении более $1,8$ В. У образцов из партии 4 ВАХ в исследуемом диапазоне являлась практически линейной.

При анализе экспериментальных вольт-фарадных характеристик исследованных образцов [4] использовались представления, разработанные для структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) [5, 6].

На рисунке 3 представлены экспериментальная и рассчитанная на основе теоретических представлений [7] ВФХ.

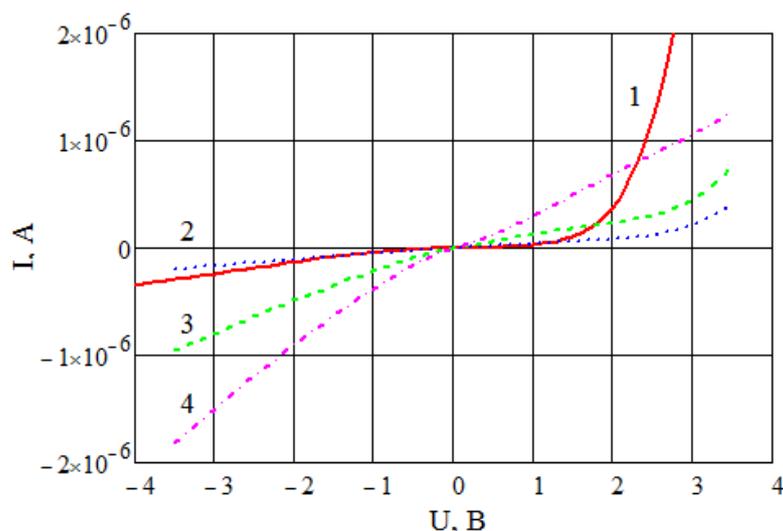


Рисунок 2 – Вольт-амперные характеристики образцов, отожженных в атмосфере аргона (1) и кислорода (2, 3, 4), измеренные на контактах Au-подложка
Figure 2 – I-U characteristics for samples annealed in Ar (1) and O (2, 3, 4) measured on Au-substrate contacts

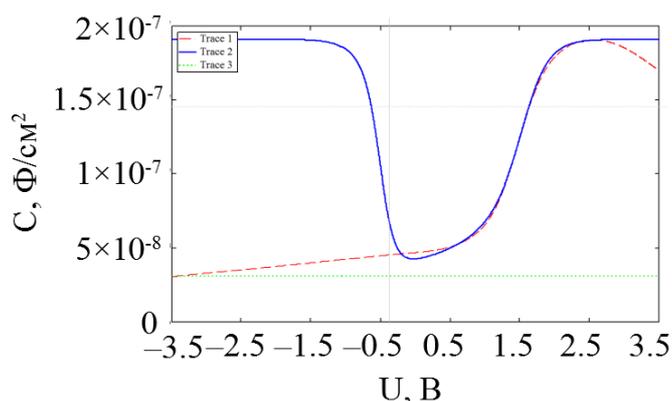


Рисунок 3 – Экспериментальная ВФХ образца партии 2 (штриховая линия) и теоретическая зависимость для идеальной МДП-структуры при низких частотах; в качестве подгоночных параметров при моделировании использовались фиксированный заряд и плотность поверхностных состояний и напряжение плоских зон (сплошная линия) [7]
Figure 3 – Experimental C-U characteristic for group 2 sample (solid line) and theoretical characteristics for ideal MIS structure on low frequency (dashed line) [7]

Основываясь на полученных характеристиках и значениях электрофизических параметров гетероструктур, определены преобладающие механизмы переноса заряда.

Наиболее вероятными механизмами переноса носителей заряда в твёрдых телах являются токи, ограниченные пространственным зарядом (ТОПЗ), надбарьерная эмиссия (эффект Ри-

чардсона – Шоттки) и объемный механизм, обусловленный эффектом Пула – Френкеля. Аналитические соотношения, используемые в настоящей работе, приведены в [8, 9]. Поскольку измерения ВАХ образцов гетероструктур проводились при комнатной температуре ($T = 300$ К), в настоящей работе исключены из рассмотрения такие механизмы переноса заряда, как прыжковая проводимость и туннелирование сквозь слой диэлектрика, однако вследствие малой эквивалентной толщины пленки оксида цинка наличие указанных механизмов может считаться возможным.

Ток, ограниченный пространственным зарядом

В случае омического контакта ток, ограниченный пространственным зарядом, представляет собой ток, который определяется пространственным зарядом, инжектированным в зону проводимости диэлектрика из металлического контакта [9].

Для реальных диэлектриков характерно присутствие большого количества ловушечных центров. Если диэлектрик содержит ловушки, большая часть инжектированного пространственного заряда захватывается ими, при этом концентрация свободных носителей становится намного меньше, чем в совершенном диэлектрике при температуре, отличной от 0 К.

Вольт-амперная характеристика структуры с диэлектриком, содержащим ловушки, описывается выражением [9]

$$J = \frac{9}{8} \cdot \mu \varepsilon \varepsilon_0 \theta \cdot \frac{U^2}{d^3}, \quad (1)$$

где d – толщина плёнки, J – плотность тока, U – напряжение, μ – подвижность носителей заряда, ε – относительная диэлектрическая проницаемость изолятора, ε_0 – диэлектрическая постоянная, θ – коэффициент для учета влияния на процесс переноса заряда мелких ловушек. При этом напряжение перехода от омической проводимости к проводимости, обусловленной ТОПЗ, определяется как

$$U_x = \frac{8qn_0d^2}{9\varepsilon\varepsilon_0\theta} \approx \frac{qn_0d^2}{\varepsilon\varepsilon_0\theta}, \quad (2)$$

где q – элементарный заряд, n_0 – концентрация свободных носителей заряда.

При инжектировании в диэлектрик значительного заряда ловушки могут полностью заполниться (предельное заполнение ловушек, которое обозначим как ПЗЛ).

В случае дальнейшего инжектирования заряда увеличение концентрации свободного заряда в зоне проводимости приводит к увеличению общего тока. При этом характер ВАХ определяется выражением (1), как в случае диэлектрика, не содержащего ловушки, т.е. $\theta = 1$. Напряжение, при котором происходит предельное заполнение ловушек, определяется выражением

$$U_{ПЗЛ} = \frac{qN_t d^2}{2\varepsilon\varepsilon_0}, \quad (3)$$

где N_t – концентрация мелких ловушек. При превышении напряжения на структуре над $U_{ПЗЛ}$, ток растет быстрее в θ^{-1} раз.

ВАХ исследуемых гетероструктур In/ZnO/n-Si измерены при прямом смещении в диапазоне напряжений от 0 В до 2 В с шагом 0,1 В, при этом положительное напряжение подавалось на In контакт. При обратном смещении ВАХ измерена в диапазоне напряжений от 0 В до –2 В с шагом изменения напряжения 0,1 В, при этом положительное напряжение подавалось на кремниевую подложку. Выбор диапазона изменения напряжения обусловлен необходимостью избежать электрического пробоя. В соответствии с соотношением (2) получены значения U_x без учета влияния ловушечных уровней ($\theta = 1$), равные 0,32 мкВ, 0,15 мкВ, 1,25 мкВ и 1,3 мкВ для образцов партий 1, 2, 3 и 4 соответственно. Значение n_0 получено из соотношения $n_0 = (q\mu RS/d)^{-1}$, где S – площадь контакта, R – сопротивление структуры, полученное из ВАХ.

На рисунке 4 приведены прямые ветви ВАХ исследуемых образцов в координатах $\ln I - \ln U$ аналогично зависимостям, приведённым в [9].

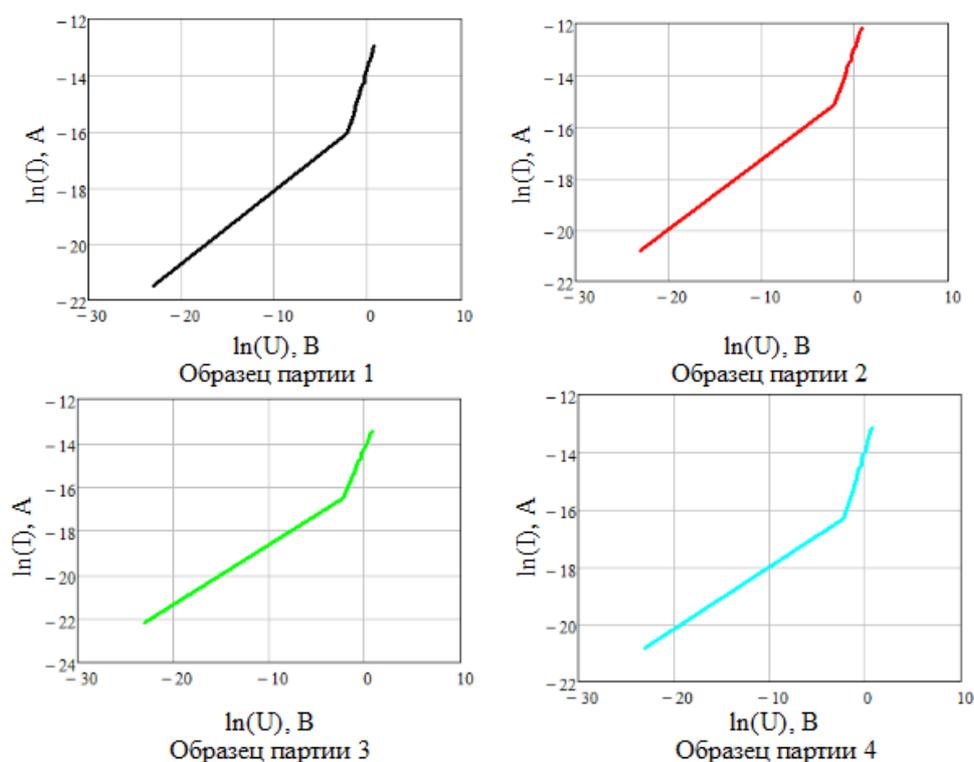


Рисунок 4 – Прямые ветви ВАХ в координатах $\ln I - \ln U$
Figure 4 – Direct branches of I-U characteristics in $\ln I - \ln U$ coordinates

На каждой ВАХ в координатах $\ln I - \ln U$ выделены два квазилинейных участка. Линейные участки ВАХ, расположенные ближе к началу координат, соответствовали омической проводимости. Напряжение перехода от участка омической проводимости к проводимости, обусловленной пространственным зарядом, составило по абсолютной величине $\sim 0,1$ В для всех групп образцов. Однако следует допустить вероятность, что напряжение U_x для всех групп образцов имело меньшую величину, неразличимую при проведении измерений ВАХ с шагом изменения напряжения 0,1 В.

Значения коэффициента θ , определенные в настоящей работе по формуле (2) при $U_x = 0,1$ В и рассчитанные по значениям ВАХ при $U_x = 0,1$ В, для всех групп образцов приведены в таблице 1.

Полученные значения θ находились в диапазоне $10^{-6} - 10^{-5}$, что соответствует данным [9] и подтверждает наличие механизма ТОПЗ. Однако при анализе второго линейного участка ВАХ обнаружено, что коэффициент θ не является постоянной величиной и уменьшается с ростом приложенного к структуре положительного либо отрицательного напряжения. Это свидетельствует об одновременном действии нескольких механизмов переноса носителей заряда.

При анализе хода второго линейного участка ВАХ сделан вывод, что существование предела заполнения ловушек не является очевидным.

Таблица 1 – Значения коэффициента θ

Table 1 – Values of θ coefficient

Значения коэффициента θ	Партия образцов			
	1	2	3	4
Определенное из формулы (2), $\times 10^{-5}$	0,318	1,298	0,147	1,246
Определенное по значениям прямой ветви ВАХ, $\times 10^{-5}$	0,284	1,149	0,130	1,094
Определенное по значениям обратной ветви ВАХ, $\times 10^{-5}$	0,281	1,154	0,130	1,100

Эффект Ричардсона – Шоттки

Изменение высоты потенциального барьера, обусловленное взаимодействием приложенного поля с потенциалом изображения, определяется как

$$\Delta\varphi_s = \left(\frac{q^3}{4\pi\epsilon^*\epsilon_0} \right)^{0,5} \cdot F^{0,5} = \beta_s F^{0,5}, \quad (4)$$

где F – напряжённость электрического поля ϵ^* – высокочастотная диэлектрическая постоянная. Значение ϵ^* равно квадрату показателя преломления диэлектрика. Размерность коэффициента β_s , используемого в выражении (4), – Дж·см^{1/2}/В^{1/2}. Размерность коэффициента β_s в общепринятых единицах – (см·В)^{1/2}.

В общепринятых единицах выражение (4) принимает вид

$$\Delta\varphi_s = \left(\frac{3,8 \cdot 10^{-4}}{\epsilon^{*0,5}} \right)^{0,5} \cdot F^{0,5}. \quad (5)$$

С учётом понижения барьера за счёт сил изображения ток эмиссии через барьер подчиняется закону Ричардсона – Шоттки:

$$J = AT^2 \cdot \exp\left(\frac{-\varphi_m}{kT}\right)^{0,5} \cdot \exp\left(\frac{\beta_s F^{0,5}}{kT}\right), \quad (6)$$

где $A = \frac{4\pi qmk^2 T^2}{h^2}$, h – постоянная Планка.

При наблюдении эффекта Ричардсона – Шоттки в диэлектриках ВАХ в координатах $\ln I - U^{0,5}$ имеет линейный характер. В то же время линейная зависимость $\ln I - U^{0,5}$ не обязательно свидетельствует о присутствии эффекта Ричардсона – Шоттки.

Эффект Пула – Френкеля

Объемный механизм переноса заряда на основе эффекта Пула-Френкеля заключается в понижении кулоновского потенциального барьера при воздействии электрического поля. Этот эффект аналогичен эффекту Шоттки, но действует в объёме вещества.

Потенциальная энергия электрона в кулоновском поле равна $-q^2/4\pi\epsilon_0\epsilon^*$, что в четыре раза больше энергии, обусловленной силами изображения. Таким образом, понижение кулоновского барьера $\Delta\varphi_{P-F}$ за счет эффекта Пула – Френкеля в однородном электрическом поле вдвое больше понижения, вызванного эффектом Шоттки на нейтральном барьере (4):

$$\Delta\varphi_{P-F} = \left(\frac{q^3}{\pi\epsilon^*\epsilon_0} \right)^{0,5} \cdot F^{0,5} = \beta_{P-F} F^{0,5}. \quad (7)$$

Размерность коэффициента β_{P-F} аналогична размерности коэффициента β_s .

Ионизационный потенциал атомов твердого тела в присутствии однородного поля понижается на величину $\Delta\varphi_{P-F}$. Полевая зависимость проводимости σ определяется выражением

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp\left(\frac{\beta_{P-F} F^{0,5}}{2kT}\right), \quad (8)$$

где $\sigma_0 = qN_c\mu \cdot \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right)$ – проводимость в слабых полях, E_g – ширина запрещенной зоны,

N_c – плотность состояний в зоне проводимости.

Поскольку в диэлектриках содержится большое число ловушек, имеющих барьер кулоновского типа, внешнее электрическое поле посредством эффекта Пула – Френкеля увеличивает вероятность выброса электронов, захваченных на эти ловушки. Для мелких ловушек плотность тока через диэлектрик равна:

$$J = J_0 \cdot \exp\left(\frac{\beta_{P-F} F^{0,5}}{kT}\right), \quad (9)$$

где $J_0 = \sigma_0 \cdot F$.

Различие эффектов Ричардсона-Шоттки и Пула-Френкеля на графике ВАХ заключается в разной крутизне наклона зависимости тока через структуру от напряженности поля. Зависимость $\ln J \cdot F^{1/2} / kT$ представляет собой прямую линию с наклоном β_S для эффекта Ричардсона – Шоттки и β_{P-F} для эффекта Пула-Френкеля. Значение углового коэффициента β_{P-F} в 2 раза больше значения коэффициента β_S .

Механизм переноса заряда в исследуемой структуре определялся путём сравнения экспериментально определенных значений коэффициентов β_S и β_{P-F} с их теоретическими значениями.

На рисунке 5 приведены прямые ветви ВАХ исследуемых образцов в координатах $\ln J \cdot E^{1/2} / kT$. Для построения обратной ветви ВАХ использованы абсолютные величины токов и напряжений.

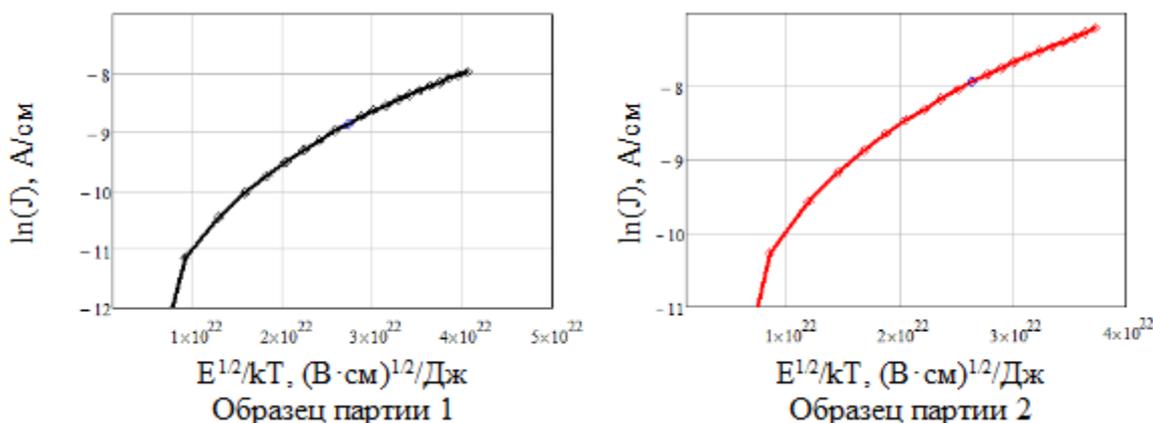
В координатах $\ln J \cdot F^{1/2} / kT$ на каждой ВАХ зависимости линейны для всех групп образцов от ~1 до 2 В. Теоретические значения угловых коэффициентов β_S и β_{P-F} для ZnO составили $1,9 \cdot 10^{-4} (\text{см} \cdot \text{В})^{1/2}$ и $3,8 \cdot 10^{-4} (\text{см} \cdot \text{В})^{1/2}$ соответственно. Результаты измерения угловых коэффициентов прямых и обратных ветвей ВАХ в координатах $\ln J \cdot F^{1/2} / kT$ и сравнение с теоретическими значениями угловых коэффициентов β_S и β_{P-F} приведены в таблице 2.

Отношение экспериментального и теоретического значений углового коэффициента для эффекта Пула – Френкеля близко к 1 как для прямой, так и для обратной ветвей ВАХ в диапазоне напряжений от 1 до 2 В для всех групп образцов. Следовательно, объемный механизм переноса заряда, обусловленный эффектом Пула – Френкеля, является преобладающим над эмиссией Шоттки. Можно предположить значительную роль донорных ловушечных уровней в процессе переноса заряда в пленках ZnO.

Наиболее близким к 1 отношением β_S / β_{P-F} обладали образцы партии 3, подвергавшиеся отжигу в атмосфере кислорода, не содержащего примеси. Предположительно отжиг в чистой кислородной среде привел к уменьшению концентрации кислородных вакансий, образующих донорные глубокие уровни, поэтому для образцов партии 3 эффект Пула – Френкеля проявился наиболее слабо среди всех групп образцов. При этом экспериментальные результаты показали меньшую плотность тока, протекающего через образцы партии 3, чем возможную теоретически.

Для образцов групп партий 1 и 2 и 4 отношение $\beta_S / \beta_S > 2$. Соответственно эффект Ричардсона – Шоттки для образцов этих групп проявлялся слабо.

Отношение β_S / β_S для образцов партии 3 являлось наиболее близким к 1. Это означает, что на перенос носителей заряда под действием электрического поля в образцах этой группы влияли как эффект Пула-Френкеля, так и эффект Ричардсона – Шоттки.



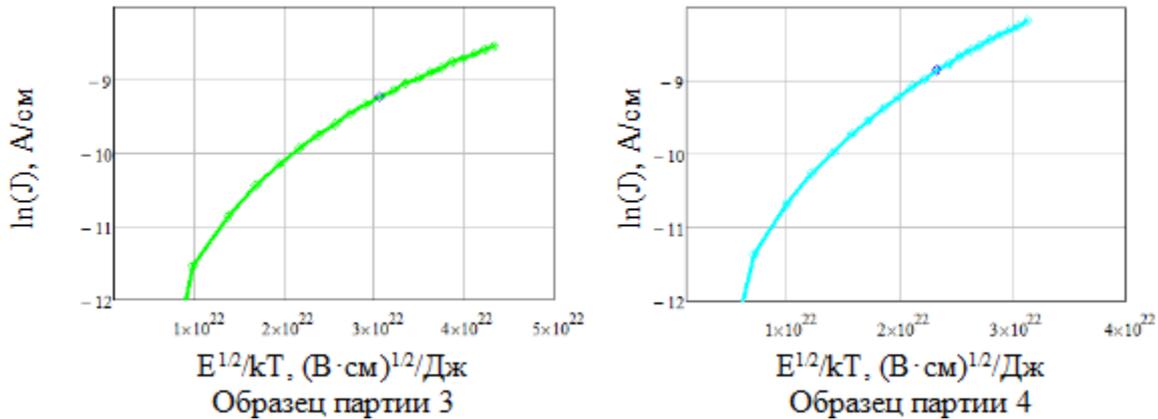


Рисунок 5 – Прямые ветви ВАХ в координатах $\ln J-F^{1/2}/kT$
 Figure 5 – Direct branches of I-U characteristics in $\ln J-F^{1/2}/kT$ coordinates

Таблица 2 – Результаты расчета угловых коэффициентов прямых и обратных ветвей экспериментальных ВАХ в координатах $\ln J-F^{1/2}/kT$

Table 2 – Values of β coefficient for direct and reverse I-U branches in $\ln J-F^{1/2}/kT$ coordinates

Параметр ВАХ	Партия образцов			
	1	2	3	4
Экспериментальное значение углового коэффициента прямой ветви ВАХ $\beta_{Эпр} \cdot 10^4$ (см·В) ^{1/2}	4,11	4,13	3,45	5,19
Экспериментальное значение углового коэффициента обратной ветви ВАХ $\beta_{Эоб} \cdot 10^4$ (см·В) ^{1/2}	4,44	4,49	3,46	6,06
Отношение $\beta_{Эпр}/\beta_{P-F}$	1,09	1,09	0,91	1,37
Отношение $\beta_{Эоб}/\beta_{P-F}$	1,17	1,18	0,91	1,6
Отношение $\beta_{Эпр}/\beta_S$	2,17	2,18	1,82	2,74
Отношение $\beta_{Эоб}/\beta_S$	2,34	2,37	1,82	3,19

Расчет и построение зонных диаграмм

Согласно полученным электрофизическим характеристикам и литературным данным [9, 10] были рассчитаны необходимые параметры и проведено моделирование зонных диаграмм гетероструктур Me/ZnO/n-Si. Параметры материалов рассмотренных гетероструктур представлены в таблице 3.

Согласно проведенным расчётам и литературным данным при подключении Au-подложка на границе Au/ZnO образуется выпрямляющий контакт, высота потенциального барьера которого составляет порядка 0,67 эВ. На границе ZnO/n-Si образуется омический контакт, в результате чего в плёнке оксида цинка происходит соответствующий изгиб зон (рисунок 6).

Таблица 3 – Параметры материалов исследуемых гетероструктур

Table 3 – Characteristics of materials for investigated heterostructures

Параметры	ZnO				In	Au	n-Si
	Партия образцов						
	1	2	3	4			
Ширина запрещенной зоны E_g , эВ	3,37				-	-	1,12
Положение уровня Ферми относительно дна зоны проводимости $E_f - E_C$, эВ	-0,67	-0,66	-0,65	-0,67	-	-	-0,17
Энергия электронного сродства $q\chi$, эВ	4,2				-	-	4,05
Работа выхода из материала $q\phi$, эВ	4,87	4,86	4,85	4,87	3,9	4,8	4,22

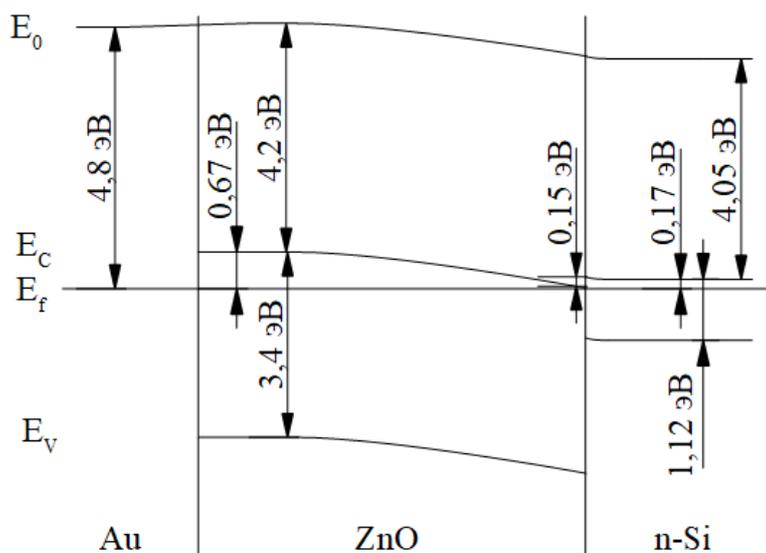


Рисунок 6 – Зонная диаграмма гетероструктуры Me/ZnO/n-Si партии 1 для выпрямляющего контакта

Figure 6 – Band diagram for group 1 sample of Me/ZnO/n-Si heterostructure on rectifying contact

В случае подключения In-подложка на основании результатов моделирования сделан вывод, что в плёнке ZnO на границе In/ZnO присутствуют ловушки, экранирующие заряд в приповерхностном слое (рисунок 7). В связи с малой толщиной слоя ZnO дефекты структуры материала, создающие ловушки, являются поверхностными. Параметры указанных ловушек и экранирующего слоя являются предметом дальнейших исследований.

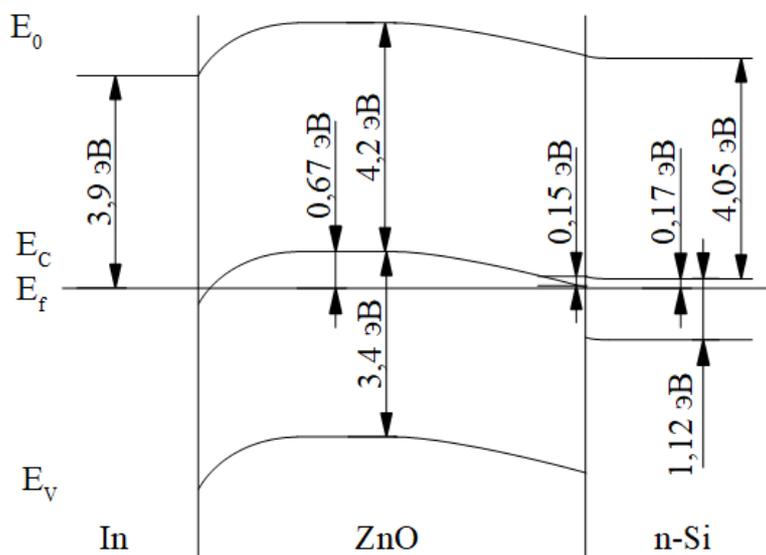


Рисунок 7 – Зонная диаграмма гетероструктуры Me/ZnO/n-Si партии 1 для невыпрямляющего контакта

Figure 7 – Band diagram for group 1 sample of Me/ZnO/n-Si heterostructures on ohmic contact

Заключение

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование гетероструктур металл-диэлектрик-полупроводник на основе гетероперехода ZnO/Si. При анализе считалось, что оксид цинка является диэлектриком и к исследованным образцам применимы методы экспериментального исследования и теоретического описания вольт-фарадных характеристик МДП-структур.

Проведён анализ действующих в структурах механизмов переноса носителей заряда. Установлено, что основными оказались процессы, обусловленные токами, ограниченными пространственным зарядом. Наличие туннельного эффекта не было экспериментально подтверждено и требует дальнейших исследований.

На основе анализа зонных диаграмм, построенных путем моделирования на основе опубликованных в литературе и расчетных параметров, а также экспериментальных ВАХ, определено, что в плёнке ZnO присутствуют ловушки, экранирующие заряд в приповерхностном слое. В связи с этим в объёме плёнки концентрация свободных носителей относительно мала, что обеспечивает высокое сопротивление тонких плёнок ZnO. Параметры указанных ловушек и экранирующего слоя являются предметом дальнейших исследований.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в региональном центре зондовой микроскопии коллективного пользования (РЦЗМки) и научно-образовательном центре неупорядоченных и наноструктурированных материалов и устройств на их основе (НОЦ «ННМУ») при Рязанском государственном радиотехническом университете имени В.Ф. Уткина.

Библиографический список

1. **Pintilie L. and Pintilie I.** Ferroelectrics: new wide-gap materials for UV detection, Mater. Sci. Eng. B. Mar. 2001, vol. 80, no. 1-3, pp. 388-391.
2. **Morkoç H. and Özgür Ü.** Technology, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2009, 490 p.
3. **Litvinov V. G., Ermachikhin A. V., Kusakin D. S., Vishnyakov N. V., Maslov A. D., Semenov A. R.** Measurement complex to investigate electrophysical and noise characteristics of semiconductor micro- and nanostructures // 24th International Conference on Noise and Fluctuations (ICNF). Vilnius, Lithuania. 20-23 June 2017, pp. 1-4.
4. **Литвинов В. Г., Семенов А. Р., Холомина Т. А., Ермачихин А. В., Рыбин Н. Б., Громов Д. Г.** Исследование спектра поверхностных состояний на границе раздела гетероструктуры ZnO/Si // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2018. № 66-2. С.9-14.
5. **Sze S. M. and Ng K. K.** Physics of semiconductor devices, John Wiley&Sons, New York, 2006, 832 p.
6. **Terman L. M.** An Investigation of Surface States at a Silicon/Silicon Dioxide Interface Employing Metal-Oxide-Silicon Diodes // Solid-state Electron. 1962, 5, 285 p.
7. **Semenov A. R., Litvinov V. G., Kholomina T. A., Ermachikhin A. V., Rybina N. V., Gromov D. G., Oleinik S.P.** Investigating and modeling high frequency C-V characteristics of zinc oxide-based heterostructures Budva: IEEE, MECO. 2018, pp. 1-4.
8. **Тутов Е. А.** Механизмы токопереноса в структуре Al/ZnO/Si / Е.А. Тутов, Ф.А. Тума, В.И. Кукуев // Конденсированные среды и межфазные границы. 2006. № 4 (8). С. 334-340.
9. **Майселл Л., Глэнг Р.** Технология тонких пленок. Справочник. Том 2. / пер. с англ. под ред. Елинсона. М.: Советское радио, 1977. 768 с.
10. **Маллер Р.** Элементы интегральных схем: пер. с англ. / Р. Маллер, Т. Кейминс. М.: Мир, 1989. 630 с.

UDC 621.315

RESEARCH OF CHARGE TRANSFER MECHANISMS IN METAL-ZnO-SILICON HETEROSTRUCTURES

A. R. Semenov, postgraduate student, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0003-2780-5661, e-mail: sem-a-sem@mail.ru

M. V. Golovanova, student RSREU, Ryazan,

orcid.org/0000-0002-3595-1426, e-mail: golovanova_m_v@rambler.ru

V. G. Litvinov, Ph.D. (Phys. and Math.), associate professor, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0001-6122-8525, e-mail: vglit@yandex.ru

D. G. Gromov, Dr. Sc. (Tech.), full professor, MIET, Zelenograd, Russia;
orcid.org/0000-0002-4563-9831, e-mail: gromadima@gmail.com

S. P. Oleynik, Ph.D. (Phys. and Math.), Head of the Department, MIET, Zelenograd, Russia;
orcid.org/0000-0001-8514-9530, e-mail: 0111959sp@mail.ru

T. A. Kholomina, Dr. Sc. (Phys. and Math.), full professor, Head of the Department, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0003-3902-618X, e-mail: marta.tap@yandex.ru

A. V. Ermachikhin, Ph.D. (Phys. and Math.), associate professor, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0002-3808-9691, e-mail: al.erm@mail.ru

*Results of the study of charge transfer mechanisms in thin films of zinc oxide on the example of metal-ZnO-silicon heterostructures under the action of electric field based on experimental current-voltage and high-frequency capacitance-voltage characteristics were considered. Obtained results have shown the significant influence of surface defects and electron traps on electrophysical parameters and energy bands of Me/ZnO/Si based heterostructures. **The aim of this work** is to study charge transfer mechanisms of metal-insulator-semiconductor structures based on ZnO/Si heterojunction as well as to determine their band structures. ZnO films were grown by pyrolytic decomposition method at different annealing conditions. Electrical properties of the structures were studied by the methods of high-frequency capacitance-voltage characteristics and current-voltage characteristics.*

Key words: charge transfer mechanisms, heterostructure, ZnO, band diagrams, I-U-characteristics, C-U-characteristics.

DOI: 10.21667/1995-4565-2019-70-179-189

References

1. **Pintilie L. and Pintilie I.** *Ferroelectrics: new wide-gap materials for UV detection*, Mater. Sci. Eng. B. Mar. 2001, vol. 80, no. 1-3, pp. 388-391.
2. **Morkoç H. and Özgür Ü.** *Technology*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. 2009, 490 p.
3. **Litvinov V. G., Ermachikhin A. V., Kusakin D. S., Vishnyakov N. V., Maslov A. D., Semenov A. R.** Measurement complex to investigate electrophysical and noise characteristics of semiconductor micro- and nanostructures. *24th International Conference on Noise and Fluctuations (ICNF)*. Vilnius, Lithuania. 20-23 June 2017, pp. 1-4.
4. **Litvinov V. G., Semenov A. R., Holomina T. A., Ermachihin A. V., Rybin N. B., Gromov D. G.** Issledovanie spektra poverhnostnykh sostoyanij na granice razdela geterostruktury ZnO/Si. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2018, no. 66-2, pp.9-14. (in Russian).
5. **Sze S. M. and Ng K. K.** *Physics of semiconductor devices*, John Wiley&Sons, New York, 2006, 832 p.
6. **Terman L. M.** *An Investigation of Surface States at a Silicon/Silicon Dioxide Interface Employing Metal-Oxide-Silicon Diodes* *Solid-state Electron*. 1962, 5, 285 p.
7. **Semenov A. R., Litvinov V. G., Kholomina T. A., Ermachikhin A. V., Rybina N. V., Gromov D. G., Oleinik S.P.** Investigating and modeling high frequency C-V characteristics of zinc oxide-based heterostructures Budva: *IEEE, MECO*. 2018, pp. 1-4.
8. **Tutov E.A.** Mehanizmy tokoperenosa v strukture Al/ZnO/Si (Current transfer mechanisms in Al/ZnO/Si structure)/ E.A. Tutov, F.A. Tuma, V.I. Kukuev. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granicy*. 2006, no. 4 (8), pp. 334-340. (in Russian).
9. **Maissel L.I., Glang R.** *Handbook of thin film technology*. L. I. Maissel, R. Glang, McGraw-Hill, 1970, 768 p.
10. **Muller R. S., Chan M., Kamins T.I.** *Device electronics for integrated circuits*. 3rd Ed by R.S. Muller, M. Chan, T.I. Kamins, Wiley India Pvt. Limited. 2003, 630 p.