

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.385.735

**В.К. Свешников, А.Ф. Базаркин**

### ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ОКСИДНОГО КАТОДА ПРИ АДСОРБЦИИ НАТРИЯ

*Предложена математическая модель электропроводности оксидного покрытия при адсорбции натрия с учетом объёмных донорных уровней. Составлен алгоритм расчета температурной зависимости электропроводности. Выполнен расчет электропроводности для бариевого катода с учетом воздействия натрия. Приведенная методика компьютерного расчета для бариевого катода может быть распространена на катоды с другими типами покрытий.*

**Ключевые слова:** электропроводность, натрий, оксид бария, алгоритм, подвижность, концентрация, гетерогенная реакция.

**Введение.** Приоритетными направлениями в энергетике являются разработка и дальнейшее развитие приборов с парами натрия, в частности натриевых ламп низкого и высокого давлений. Высокая электропроводность плазмы и другие ее особенности открывают возможность разработки новых приборов электронной техники, источников ионов натрия, генераторов шумов, рядников.

Факт повышения электропроводности при адсорбции натрия является дополнительным резервом дальнейшего повышения световой отдачи натриевых ламп и уменьшения уровня радиопомех.

Отсутствие значений электропроводности оксидного катода при адсорбции натрия затрудняет расчет электрических потерь в катодном покрытии приборов. Экспериментальное определение электропроводности катодов вызывает затруднения, связанные с высокой химической активностью натрия, сложной конструкцией экспериментальных приборов. Компьютерный расчет электропроводности оксидного катода при адсорбции натрия на основе известных параметров позволяет сократить материальные затраты на проведение экспериментов.

В статье предложена математическая модель электропроводности оксидного покрытия при адсорбции натрия с учетом объёмных донорных уровней. Составлен алгоритм расчета температурной зависимости электропроводности. Выполнен расчет электропроводности для бариевого катода с учетом воздействия натрия.

**Математическая модель электропроводности оксидного покрытия.** В натриевых лампах, лазерах с парами натрия натрий сорбируется катодом, в результате чего изменяется работа выхода [1] и электропроводность оксидного покрытия.

Электропроводность твердого тела определяется  $n_e$  концентрацией и  $u$  подвижностью свободных электронов:

$$\sigma = en_e u, \quad (1)$$

где  $e$  – элементарный заряд электрона.

Входящая в (1) подвижность электронов определяется рассеянием и потерей энергии столкновения их с элементами кристаллической решетки, а также средней длиной свободного пробега. Согласно [2] она равна:

$$u = \beta \frac{e \lambda_e \bar{v}}{m \bar{v}_e}, \quad (2)$$

где  $\beta = 0,815$  – константа уравнения Ланжевена,  $\lambda_e$  – средняя длина пробега электрона,  $\bar{v}$  – среднее число столкновений,  $m$  – эффективная масса электрона,  $\bar{v}_e$  – средняя скорость направленного движения электронов.

Формула (2) качественно описывает зависимость подвижности электронов в полупроводнике от средней длины его свободного пробега и числа их столкновений с атомами кристалла. Поэтому в расчетах электропроводности целесообразно использовать экспериментальные дан-

ные значений подвижности. Экспериментальные результаты измерений подвижности электронов в оксиде бария приведены в работе [3]. Среднее значение  $u$  составляет  $5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{в}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ . Аналогичные численные значения подвижности электронов для оксида бария приводятся также в работах [4, 5].

Концентрация  $n_e$  электронов на уровне донорной примеси определяется формулой [6]:

$$n_e = \frac{n_d}{\frac{1}{2} \exp((E_d - \mu_n) / kT) + 1}. \quad (3)$$

Здесь  $n_e$  – концентрация донорных центров в объеме оксидного слоя,  $E_d$  – энергия донорных уровней в объеме,  $\mu_n$  – локальный уровень Ферми,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура катода.

Входящий в (3) локальный уровень Ферми  $\mu_n$  согласно [7] равен:

$$\mu_n = -kT \ln \left[ \frac{\left( 1 + 4 \exp(E_d / kT) \left( \frac{n_d}{\frac{2}{h^3} \left( \frac{mkT}{2\pi} \right)^{3/2}} \right) \right)^{1/2} - 1}{2 \exp(E_d / kT)} \right], \quad (4)$$

где  $\hbar$  – постоянная Планка.

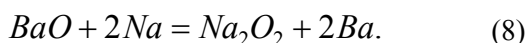
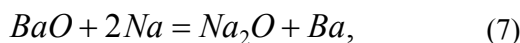
Если подставить (3), (4) в (1), формула для расчета температурной зависимости электропроводности оксида бария примет вид:

$$\sigma = eu \frac{n_d}{\frac{1}{2} \exp((E_d - \mu_n) / kT) + 1}. \quad (5)$$

В процессе работы катода атомы натрия диффундируют в оксидное покрытие. В результате реакции натрия с оксидом бария образуется дополнительный барий  $n_{Ba}$ . Он является донорной примесью, приводящей к увеличению электропроводности. С учетом этого формула для расчета температурной зависимости электропроводности оксида бария при воздействии натрия примет вид:

$$\sigma = eu \frac{n_d + n_{Ba}}{\frac{1}{2} \exp((E_d - \mu_n) / kT) + 1}. \quad (6)$$

Дополнительная концентрация атомов бария образуется в результате гетерогенных химических реакций (7) и (8):



Продуктами реакции (8) и (9) являются оксид и пероксид натрия, локализующиеся в оксидном покрытии катода.

Входящая в (6) концентрация  $n_{Ba}$  определяется из условия равновесия реакций (7) и (8) по значениям  $K$  констант равновесия:

$$n_{Ba} = Kn_{Na}^2 kT. \quad (9)$$

Здесь  $n_{Na}$  – концентрация атомов натрия в объеме оксидного покрытия.

Константа равновесия  $K$  находится по изменениям  $\Delta H$  энтальпии и  $\Delta S$  энтропии с использованием справочных данных [8]:

$$K = \exp\left(-\frac{\Delta H + T\Delta S}{RT}\right), \quad (10)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Нами рассчитаны константы реакций (7), (8), которые при  $T = 600 \text{ К}$  соответственно равны  $10^{-14}$  и  $10^{-53}$ . Реакция (8), протекающая с образованием пероксида натрия, практически не влияет на электропроводности катода. Поэтому в расчетах реакцию (8) не учитываем.

Объемная концентрация натрия  $n_{Na}$ , входящая в (9), связана с поверхностной  $N$  концентрацией соотношением [4]:

$$n_{Na} = N^{3/2}. \quad (11)$$

Поверхностная концентрация натрия на катоде равна [1]:

$$N = \frac{N_1 P \tau_0}{\alpha_k P \tau_0 + N_1 \sqrt{2\pi M k T_T} \exp(-\Phi / kT)}, \quad (12)$$

где  $N_1$  – число частиц на  $1 \text{ м}^2$  образующих молекул,  $P$  – давление паров натрия,  $\tau_0$  – период колебания атомов решетки вещества, на поверхности которого происходит адсорбция,  $\alpha_k$  – коэффициент конденсации,  $M$  – атомная масса адсорбируемой частицы,  $T_T$  – температура разрядной трубки,  $\Phi$  – энергия адсорбции натрия на катоде.

Входящая в (12) энергия адсорбции атомов натрия определяется по формуле [9]:

$$\Phi = \frac{4,574(\lg P_2 - \lg P_1)}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}. \quad (13)$$

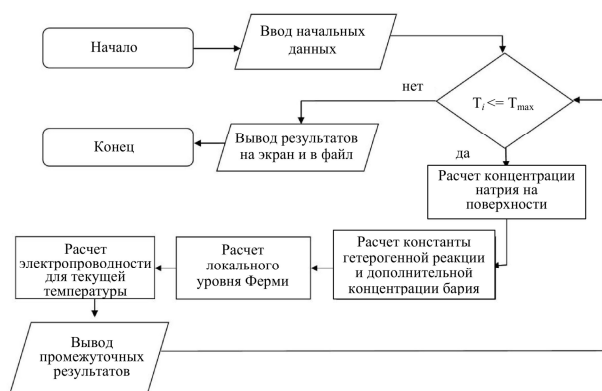
Здесь  $P_2$  и  $P_1$  – соответственно равновесные давления паров натрия при температурах  $T_2$  и  $T_1$ .

Подставляя в (6) выражения (9, 10, 11, 12) окончательно получаем формулу для расчета температурной зависимости электропроводности оксида бария при адсорбции натрия:

$$\sigma = eu \frac{n_d + \exp\left(-\frac{\Delta H + T\Delta S}{RT}\right) \left(\frac{N_i P \tau_0}{\alpha_i P \tau_0 + N_i \sqrt{2\pi M k T} \exp(-\Phi/kT)}\right)^3}{\frac{1}{2} \exp((E_d - \mu_n)/kT) + 1} kT \quad (14)$$

Из формулы следует, что электропроводность оксидного покрытия катода при воздействии натрия зависит от концентрации донорных центров и адсорбированных на катоде атомов натрия. С увеличением температуры электропроводность катода возрастает.

**Алгоритм расчета электропроводности бариевого катода при воздействии натрия.** На основе выражений (5), (6), (9–14) нами составлен алгоритм компьютерного расчета электропроводности бариевого покрытия при воздействии натрия. Алгоритм изображен на рисунке.



**Блок-схема алгоритма расчета электропроводности оксидного покрытия при воздействии натрия**

Расчёт электропроводности оксида бария при адсорбции натрия нами выполнен в диапазоне температур 600–900 К. При расчете приняты следующие параметры:  $N_i = 10^{18} \text{ м}^{-2}$  [1],  $E_d = 1,2 \text{ эВ}$  [4],  $d = 1,89 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ ,  $a = 2,59 \cdot 10^{-39} \text{ Ф/м}^2$  [10],  $\tau_0 = 10^{-12} \text{ с}$ ,  $P = 0,66$  [11] Па при температуре  $T_i = 543 \text{ К}$ ,  $M = 23 \text{ а.е.м.}$ ,  $\alpha_k = 1$  [12],  $u = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $n_d = 10^{21} \text{ м}^{-3}$  [13],  $\Phi = 1,06 \text{ эВ}$ . Результаты расчётов сведены в таблицу.

**Электропроводность бариевого катода**

Температура, К	Расчет. Электропроводность без натрия, $\text{ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$	Эксперимент [5]. Электропроводность без натрия, $\text{ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$	Электропроводность при воздействии натрия, $\text{ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$	Изменение электропроводности, %
500	$1,70 \cdot 10^{-5}$	$10^{-6}$	$1,86 \cdot 10^{-5}$	9,67
600	$1,96 \cdot 10^{-4}$	$10^{-5}$	$8,12 \cdot 10^{-4}$	75,86
700	$1,15 \cdot 10^{-3}$	$10^{-4}$	$2,07 \cdot 10^{-3}$	44,44
800	$4,30 \cdot 10^{-3}$	$10^{-3}$	$4,48 \cdot 10^{-3}$	4,01
900	$1,17 \cdot 10^{-2}$	$10^{-2}$	$1,17 \cdot 10^{-2}$	0

Из таблицы следует что при адсорбции натрия электропроводность оксида бария увеличи-

вается. Так, при температуре 600 К электропроводность оксида бария составляет  $1,96 \cdot 10^{-4} \text{ ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ , а при адсорбции натрия  $8,12 \cdot 10^{-4} \text{ ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ , т.е. изменяется на 75%. При повышении температуры влияние натрия снижается так, как происходит испарение натрия из объёма и с поверхности оксидного покрытия катода.

Согласно работе [5] электропроводность для бариевого катода при 500 К очень мала и составляет порядка  $10^{-6} \text{ ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ . При повышении температуры до 900 К электропроводность увеличивается приблизительно до  $10^{-2} \text{ ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ . Таким образом, приведенные расчётные значения электропроводности согласуются с экспериментальными данными, опубликованными в работе [5]. Согласование результатов компьютерного расчета электропроводности бариевого катода с данными [5] открывает возможность использовать эту методику для бариевого катода при адсорбции натрия.

**Заключение.** Предложена математическая модель электропроводности бариевого катода с учетом объемных донорных уровней.

1. Составлен алгоритм расчета температурной зависимости электропроводности оксидного катода.

2. Выполнен расчет электропроводности бариевого катода в зависимости от температуры. Сравнение полученной температурной зависимости электропроводности с экспериментальными данными [5] подтверждает правильность предложенной методики расчета.

3. Расчет электропроводности бариевого катода при воздействии натрия показал, что электропроводность оксидного покрытия увеличивается. Максимальное увеличение электропроводности наблюдается при 600 К.

4. Приведенная методика компьютерного расчета для бариевого катода может быть распространена на катоды с другими типами покрытий.

**Библиографический список**

1. Свеишников В.К. Исследование влияния натрия на работу выхода оксидного катода // Известия высших учебных заведений. 2012. – Т. 55. – № 1. – С. 58–61.
2. Соболев В.Д. Физические основы электронной техники. – М.: Высшая школа, 1979. – 448 с.
3. Peil E. M. Hall effect in single crystals of BaO // Phys. Rev. 1952. – V. 87. – P. 457.
4. Князев А.Я. Влияние поверхности на работу выхода и электропроводность оксидного катода // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. 1972. – № 9. – С. 54–66.
5. Мойжес Б.Я. Физические процессы в оксидном катоде. – М.: Наука, 1968. – 480 с.
6. Шалимова К.В. Физика полупроводников. –

М.: Энергоатомиздат, 1985. – 392 с.

7. Свешиников В.К., Базаркин А.Ф. Расчет температурной зависимости работы выхода оксидного катода // Электронная техника «Серия 1 СВЧ-техника». 2014. – Вып. 1(520). – С. 70–75.

8. Рябин В.А., Остроумов М.А., Свит Г.Ф. Термодинамические свойства веществ. – Л.: Химия, 1977. – 309 с.

9. Дэйшман С. Научные основы вакуумной техники. – М.: Издательство иностранной литературы, 1950. – 695 с.

10. Виноградов А.В., Шевченко В.П. Статическая дипольная поляризуемость атомов и ионов в модели

Томаса-Ферми // Тр. ФИАН. 1980. – Вып. 119. – С. 165.

11. Никольский Б.П. Справочник химика. Т.1: Общие сведения, строение вещества, свойства важнейших веществ, лабораторная техника. – Л.: Химия, 1966. – 1072 с.

12. Субботин В.И., Сорокин В.П., Чулков Б.А. Теплообмен при конденсации калиевого и натриевого пара // Общие вопросы тепломассообмена. Наука и техника. 1966. – С. 247–255.

13. Никонов Б.П. Оксидный катод. – М.: Энергия, 1979. – 240 с.

УДК 621.315.592

*Д.С. Кусакин, В.С. Литвинова, В.Г. Литвинов, Ю.В. Воробьев, Н.Б. Рыбин*

## МЕТОДИКА ЛОКАЛЬНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ ФЕМТОФАРАДНОГО ДИАПАЗОНА ТОЧЕЧНОГО БАРЬЕРНОГО КОНТАКТА МЕТАЛЛ-ПОЛУПРОВОДНИК

*Рассматриваются теоретические и практические аспекты измерения электрической емкости фемтофарадного диапазона точечно-барьерной полупроводниковой структуры металл-полупроводник, в которой потенциальный барьер формируется проводящим зондом атомно-силового микроскопа. Показана возможность проведения измерений электрической емкости с использованием зондовой системы атомно-силового микроскопа.*

**Ключевые слова:** вольт-фарадная характеристика, точечно-барьерный контакт, атомно-силовая микроскопия.

**Введение.** В современной электронике все более заметна тенденция к уменьшению размеров электронных компонентов, увеличению степени интеграции. Это влечет за собой острую необходимость наличия методов исследования и контроля параметров и характеристик материалов и структур для электроники. Решить эту проблему может адаптация существующих методик или разработка новых с учетом ограничений, связанных с размерными эффектами в полупроводниковых структурах. Развитие нанотехнологий связано с успехами в создании методов исследования физических свойств материалов и веществ в нанометровом диапазоне. Для локального измерения электрической емкости полупроводниковых структур используются зондовые методы: сканирующая емкостная микроскопия (СЕМ), сканирующая микроволновая микроскопия (СММ). К недостаткам СЕМ и СММ относится необходимость использования дорогостоящих тестовых структур, которые в Российской Федерации не производятся. Метод СММ в основном реализован на оборудовании компании Keysight Technologies. В качестве объ-

ектов исследования рекомендуется использовать структуры типа металл-диэлектрик-полупроводник [1]. Для исследования электрических свойств в нанометровом диапазоне размеров контактов используется точечный контакт проводящего зонда АСМ к поверхности полупроводниковой наноструктуры [2-4]. В работе [5] проведен анализ применения СММ для исследования полупроводниковой барьерной структуры на основе контакта металл-полупроводник. Для повышения локальности исследования необходимо уменьшать площадь барьерного контакта. Для формирования точечного барьерного контакта с нанометровыми или субмикронными размерами можно использовать проводящий зонд атомно-силового микроскопа, соединенный с внешними измерительными приборами. Несмотря на очевидные преимущества измерения электрической емкости фемтофарадного диапазона, метод СММ имеет ограниченное распространение из-за высоких требований к исследуемым объектам и из-за дороговизны приборов. Применение стандартного RLC-метра также затруднительно, поскольку фемтофарад-

ный диапазон соответствует нижней границе измеряемых величин электрической емкости. В связи с этим актуальной является разработка новой методики локального измерения электрической емкости и вольт-фарадных характеристик полупроводниковых структур металл-полупроводник, в которых барьерный контакт формируется проводящим зондом атомно-силового микроскопа.

**Целью данной работы** является разработка методики измерения вольт-фарадных характеристик, электрической емкости фемтофарадного диапазона полупроводниковых структур металл-полупроводник с использованием зондовой системы атомно-силового микроскопа.

**Теоретическая часть.** Как говорилось выше, для повышения локальности необходимо уменьшать площадь барьерного контакта. При этом появляются особенности: форма обедненного слоя в полупроводнике перестает соответствовать приближению о плоском потенциальном барьере, величина электрической барьерной емкости точечного барьерного контакта металл – полупроводник находится в атто- или фемтофарадном диапазоне, что делает практически невозможным применение выпускаемого промышленностью RLC-метра (например, E7-20, МНИ-ПИ), так как он не рассчитан на измерение емкости менее 1 фФ.

Мгновенное значение тока через барьерную емкость определяется из выражения [6]:

$$i(t) = \frac{dQ}{dt} = C(t) \frac{dU}{dt}, \quad (1)$$

где  $C(t)$  – мгновенное значение емкости, соответствующее мгновенному значению напряжения  $U(t)$ . Условно считается, что напряжение, приложенное к диоду, равно напряжению на р-п-переходе, т.е. можно пренебречь падением напряжения на последовательном сопротивлении диода [6]. К образцу прикладываются постоянное обратное напряжение и малое пилообразное (рисунок 1) амплитудой несколько  $kT/q$  ( $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура,  $q$  – элементарный заряд). Изменение постоянного напряжения приводит к смещению края области пространственного заряда (ОПЗ) в полупроводнике, что позволяет осуществить так называемое профилирование [7], а малое пилообразное напряжение используется для измерения барьерной емкости.

Таким образом, для измерения электрической емкости необходимо измерить отклик электрического тока. Из выражения (1) следует, что при значении электрической емкости 1 фФ и скорости нарастания напряжения 1000 В/с через образец потечет ток 1 пА. Измерение таких то-

ков сопряжено с определенными трудностями, поэтому целесообразно использовать большие скорости нарастания напряжения. Максимальная скорость нарастания будет ограничиваться тем, чтобы свободные носители заряда на краю ОПЗ успевали следовать за изменением электрического поля.

Величина максимального тока ограничена площадью острия зонда атомно-силового микроскопа. Известно, что плотность тока  $j = \frac{I}{S}$ , где  $I$  – величина электрического тока, протекающего через проводник, а  $S$  – поперечное сечение проводника. Про необходимое значение тока уже говорилось выше, а вот площадь определяется радиусом закругления зонда, а у проводящего зонда атомно-силового микроскопа радиус закругления лежит в диапазоне 20-100 нм. При повышении плотности тока на кончике зонда может произойти испарение проводящего покрытия зонда, толщина которого составляет обычно 20 нм (по сведению изготовителей), и дальнейшие измерения электрофизических параметров станут невозможными, так как зонд перестанет быть проводящим и его сопротивление станет много больше сопротивления образца, да и всех элементов измерительной цепи.

Если подать на образец сигнал с генератора с заданными параметрами, например пилообразный сигнал, то становится возможным измерить нано- или пикоамперные токи, а значит, рассчитать малые значения емкости, лежащие в фемтофарадном диапазоне.

Оценим возможность эксперимента для измерения малых токов и емкостей.

Период  $T = f(U_{max})$  и емкость  $C(U_{max}) = f(U_{max})$ . Получается, что

$$\frac{dU}{dt} = \frac{dU_{max}}{T}. \quad (2)$$

Если  $\frac{dU}{dt} = 10^3$ , а амплитуду напряжения взять равной  $U_{max} = 0,1$  В, то период  $T$  составит 100 мкс, что вполне выполнимо при использовании современных генераторов.

**Эксперимент.** Для возможности проведения исследований областей с размером менее 100 нм на базе зондовой системы атомно-силового микроскопа SolverPro (производитель ЗАО НТ-МДТ) был собран измерительный стенд, который включает в себя преобразователь ток-напряжение, генератор Rigol DG3101A для подачи сигнала на образец и осциллограф, для визуализации сигналов (рисунок 1).

При использовании зондового микроскопа появляется возможность выбора области исследования образца, работа в контактном режиме,

что позволит обеспечить надежный точечный контакт к исследуемому образцу.

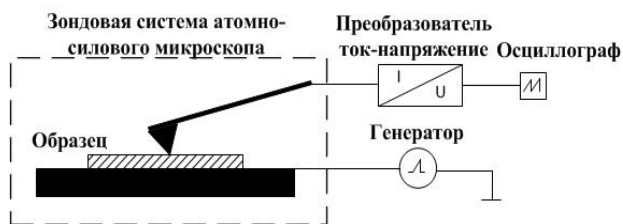


Рисунок 1 – Схема измерительной установки

Любая взаимоиндукция, взаимное влияние измеряемых сигналов и нежелательные остаточные факторы в способе соединений, присущие обычным методам подключения измерительных цепей, оказывают существенное влияние на точность измерений.

Для получения точных результатов измерения необходима подготовка измерительных контактов.

1. Следует соединить между собой внешние экраны проводов в точке, расположенной как можно ближе к точке присоединения исследуемого образца.

2. Соединение между местом, в котором кончается экранирование, и исследуемым образцом должно быть как можно более коротким.

3. Сигнальный тракт между преобразователем ток-напряжение и исследуемым образцом (измерительным столиком) должен быть как можно более коротким.

Для обеспечения этих требований был спроектирован измерительный столик для атомно-силового микроскопа.

Преобразователь ток-напряжение был спроектирован на базе быстродействующего операционного усилителя LTC6244 с уровнем входного тока 1 пА и помещен непосредственно в корпус измерительного столика атомно-силового микроскопа.

В качестве образца для апробирования методики была взята структура Шоттки Au/n-GaAs с не полностью покрытой слоем Au поверхностью.

Образец был выращен методом эпитаксии из молекулярных пучков. На подложке n+-GaAs(100) при  $T = 580^{\circ}\text{C}$  выращивался буферный слой n+-GaAs толщиной 300 нм с концентрацией электронов  $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , затем барьерный слой n-GaAs толщиной 450 нм и концентрацией  $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Далее, термическим испарением Au в вакууме на обратную сторону подложки и на покровный слой формировались омический контакт и контакт Шоттки соответственно.

Также методом вытягивания из Pt-Ir прово-

локи был изготовлен зонд для атомно-силового микроскопа. Радиус закругления зонда 5 мкм. Радиус закругления кончика АСМ зонда из Pt-Ir проволоки контролировался с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6610LV. Данный шаг обусловлен необходимостью использования проводящего зонда с известным радиусом закругления. Из-за этого выбор был сделан в пользу цельнометаллического зонда.

Подвод зонда осуществлялся к поверхности n-GaAs. На структуру с генератора был подан пилообразный сигнал амплитудой 0,1 В и периодом 100 мкс (рисунок 2).

После прохождения сигнала через преобразователь с известным коэффициентом усиления получено значение обратного тока 120 пА, что при расчете емкости с учетом площади зонда дает нам значение 12 фФ.

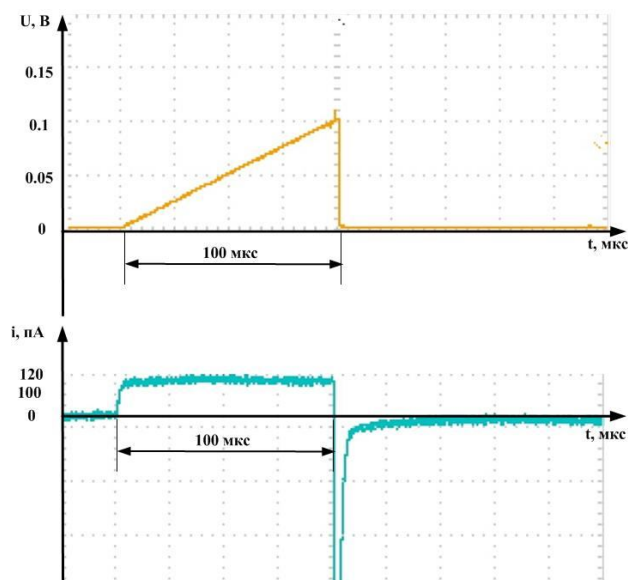


Рисунок 2 – Входной (верхний) сигнал с генератора и выходной (нижний) сигнал с преобразователя ток-напряжение

**Выводы.** Таким образом, в данной работе разработана и апробирована методика локального измерения электрической емкости фемтофарадного диапазона точечного барьерного контакта металл-полупроводник с использованием зондовой системы атомно-силового микроскопа. Методика отличается простотой реализации по сравнению с методикой СММ. Дальнейшее развитие методики будет связано с оценкой ограничений на амплитуду и длительность воздействующих сигналов, проведением экспериментов с проводящими зондами, имеющими меньший радиус закругления острия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации с использованием оборудо-

дования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования (РЦЗМкп) при ФГБОУ ВПО «РГРТУ» в НОЦ неупорядоченных и наноструктурированных материалов и устройств на их основе.

### Библиографический список

1. *Shijie Wu, Jing-Jiang Yu* Attofarad Capacitance Measurement with Scanning Microwave Microscopy. Application Note. – Agilent Technologies. 2010. 5990-5702EN.

2. *Литвинов В.Г., Рыбин Н.Б.* Токовая релаксационная спектроскопия глубоких уровней в полупроводниковых структурах на основе точечного барьерного контакта // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2012. № 42-1. С. 28-33.

3. *Litvinov V., Kozlovsky V., Sadofyev Yu., Rybin N.* Local study of the energy spectrum of electrons in

CdSe/ZnSe QD structure by current DLTS cooperated with AFM // Phys. Status Solidi C. – 2012. – V. 9. – P. 1772-1775

4. *Kozlovsky V.I., Litvinov V.G., Sviridov D.E., Milovanova O.A., Rybin N.B.* Local measurement of conduction band offset for ZnCdS/ZnSSe nanostructure by Laplace current DLTS cooperated with AFM technique // Phys. Status Solidi C. – 2010. – V. 7. – No. 6. – P. 1536-1538.

5. *Литвинова В.С., Литвинов В.Г.* Векторный анализ электрической цепи наноконтакта металл-полупроводник // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 47. С. 116 – 120.

6. *Берман Л.С.* Емкостные методы исследования полупроводников. – Л.: «Наука», 1972. – 104 с.

7. *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов: в 2-х кн. Кн. 1: пер. с англ. 2-е перераб. и доп. изд. – М.: Мир, 1984. – 456 с.

УДК 621.356

**В.Д. Рогачёв, С.В. Новиков**

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ САМОРАЗРЯДА АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

*Предложено электронное устройство, компенсирующее саморазряд аккумуляторной батареи, приведенной в рабочее состояние и находящейся на хранении. Проведено сравнение данного устройства с известными образцами. Его автономность позволяет преобразовывать солнечную энергию в электрическую и компенсировать саморазряд аккумуляторной батареи, находящейся на хранении.*

**Ключевые слова:** аккумуляторная батарея, компенсация саморазряда.

**Введение.** Готовность к использованию автомобильной и гусеничной техники в значительной мере определяется состоянием стартерных аккумуляторных батарей. Стартерные аккумуляторные батареи, установленные на автомобильную и гусеничную технику, в процессе хранения неизбежно подвержены саморазряду.

**Цель работы** – разработка рекомендаций и предложений по компенсации саморазряда стартерных аккумуляторных батарей, находящихся на хранении, с применением современного поликристаллического фотоэлемента. Схема устройства выполнена в соответствии с рисунком.

**Теоретическая часть.** Саморазряд считается нормальным, если при хранении в течение 14 суток аккумуляторная батарея теряет ёмкость не более 10 %. Сроки хранения батарей без подзаряда ограничиваются. В результате получается, что каждый месяц необходимо снимать аккумуля-

ляторные батареи, переносить для обслуживания на зарядные станции и ставить на место.

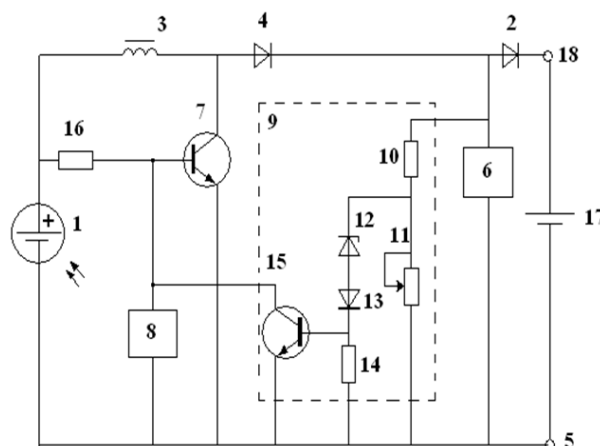
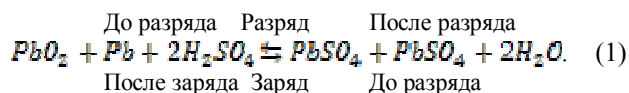


Схема электрическая устройства для компенсации саморазряда

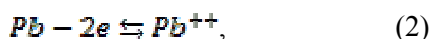
Естественный саморазряд вызывается наличием трудноудаляемых примесей металлов, содержащихся в пластинах и электролите, значительным отличием плотности электролита в верхних и нижних слоях пластины, вызывающем разность потенциалов.

Химические реакции, происходящие в свинцовом аккумуляторе, описываются теорией двойной сульфатации, и её уравнение имеет следующий вид



Сульфат свинца ( $\text{PbSO}_4$ ), образующийся при нормальном разряде, имеет мелкокристаллическую структуру и легко восстанавливается зарядным током. В результате саморазряда кристаллы сернокислого свинца имеют более крупную структуру, а при длительном хранении может образоваться сплошная корка на поверхности электродов. Такой сульфат свинца уже не восстанавливается в процессе заряда батареи, он значительно снижает её ёмкость, приводит к короблению пластин электродов и выкрашивает активную массу.

Саморазряд положительных пластин можно рассматривать как результат реакции активной массы с металлами решетки, которая подобна реакции разряда аккумулятора



так как двуокись свинца и свинцовая решетка, погруженные в электролит, представляют собой короткозамкнутый элемент [1].

Следовательно, образовавшиеся в присутствии электролита гальванические элементы, находясь в состоянии разряда, постепенно вызывают разряд пластины.

Саморазряд отрицательных пластин имеет гораздо большее значение. Он обусловлен растворением свинца в электролите. В результате образуются ионы  $\text{Pb}^{++}$ , которые перемещаясь от отрицательного электрода к положительному электроду, образуют местный простейший аккумулятор, вызывая саморазряд.

Реакцию описывают по следующей схеме



При изготовлении отрицательных пластин применяется свинец, в сплаве которого присутствуют посторонние металлы, даже в небольших количествах они уменьшают перенапряжение водорода и поэтому существенно повышают скорость реакции (3).

Причинами повышенного саморазряда являются увеличение плотности электролита и

температуры окружающей среды; различные примеси в электролите (особенно примеси металлов, которые увеличивают саморазряд отрицательных электродов).

Существующие в настоящее время устройства для компенсации саморазряда аккумуляторных батарей, находящихся на хранении (установка для подзарядки батарей малыми токами типа УПМТ и другие, описанные в печати), не в полной мере удовлетворяют требованиям эксплуатации. Во – первых, все батареи подключаются к одному источнику на одинаковое напряжение; во – вторых, регулировка тока производится дискретно: 50, 100, 150 мА. Состояние аккумуляторных батарей очень различно и зависит от их сроков эксплуатации. В результате на подключенные аккумуляторные батареи к установке подзарядки малыми токами подается одинаковое напряжение. В конечном итоге в процессе хранения аккумуляторных батарей при подзарядке малыми токами одни батареи перезаряжаются, а другие недозаряжаются. Это приводит к существенному снижению их срока службы.

**Экспериментальные исследования.** Разработанное устройство по компенсации саморазряда стартерной аккумуляторной батареи подразумевает использование фотоэлемента в качестве независимого источника питания, напряжение в цепи устройства которого будет абсолютно безопасно для человека и включать в себя автоматическое управление токами подзарядки.

Отличительной чертой данного устройства является то, что в его схему для компенсации саморазряда аккумуляторной батареи, содержащую фотоэлемент и диод защиты, дополнительно введены последовательно соединенные дроссель и диод, накопительный элемент, коммутирующий транзистор, задающий генератор импульсов и пороговое устройство.

Введение указанных элементов расширяет применимость устройства, так как возможно использование фотоэлемента с любой величиной выходного напряжения. Одно устройство сможет подзарядать 12-ти и 24-х вольтовые аккумуляторные батареи.

Устройство содержит в себе фотоэлемент 1 – источник тока, диод 2 защиты от инверсного включения аккумуляторной батареи. Между плюсовым выводом фотоэлемента 1 и анодом диода 2 защиты включены последовательно соединенные дроссель 3 и диод 4, а между анодом диода 2 и минусовой шиной 5 устройства включен накопительный элемент 6. Между средней точкой соединения дросселя 3 и диода 4 и минусовой шиной 5 включен коммутирующий транзистор 7, к базе которого подключены выходы



задающего генератора 8 и порогового устройства 9. На входе порогового устройства 9 включен регулирующий делитель напряжения, соединенный параллельно накопительному элементу 6. В пороговом устройстве между средней точкой соединения резистора 10 и потенциометра 11 и минусовой шиной 5 включены последовательно соединенные стабилитрон 12, диод 13 и резистор 14, подключенный параллельно переходу база - эмиттер транзистора 15. Выход порогового устройства 9 через коллектор транзистора 15 подключен к базе коммутирующего транзистора 7. Резистор 16 задает смещение на базе коммутирующего транзистора 7. Аккумуляторная батарея 17 подключается к устройству между плюсовой клеммой 18 и минусовой шиной 5.

Работу данного устройства можно описать следующим образом. Фотоэлемент 1 вырабатывает напряжение, которое при открытом состоянии коммутирующего транзистора 7, вызывает ток через дроссель 3. Коммутирующий транзистор 7 периодически открывается и закрывается под действием управляющих импульсов задающего генератора 8. В момент закрытия коммутирующего транзистора 7 на дросселе 3 наводится ЭДС, по величине значительно большая напряжения фотоэлемента 1. Под действием ЭДС дросселя 3 заряжается накопительный элемент 6 через диод 4. Диод 4 исключает разряд накопительного элемента 6 через фотоэлемент 1.

Накопительным элементом в данном случае применяются конденсаторы большой ёмкости или ионисторы. Величина напряжения заряда накопительного элемента регулируется потенциометром 11 порогового устройства 9. С достижением на накопительном элементе 6 напряжения требуемой величины стабилитрон 12 пробивается, транзистор 15 открывается, а коммутирующий транзистор 7 закрывается и заряд накопительного элемента 6 прекращается. Диод 2 служит защитой схемы устройства от инверсного включения аккумуляторной батареи.

При понижении температуры для увеличения напряжения, подаваемого на накопительный элемент с целью улучшения подзаряда аккумуляторной батареи, применяется диод 13, имеющий температурный коэффициент.

Аккумуляторная батарея подсоединяется на подзарядку с помощью потенциометра 11 и ус-

танавливается уровень напряжения на накопительном элементе 6, равный ЭДС заряженной батареи. Соответствующий уровень напряжения определяют по нулевым показателям миллиамперметра, который при этом включается последовательно с батареей к выходу устройства.

В процессе саморазряда аккумуляторной батареи величина ЭДС снижается и она начинает заряжаться от накопительного элемента 6, напряжение на нём тоже снижается, что приводит к закрытию стабилитрона 12 и транзистора 15. После этого начинает работать задающий генератор 8 и переключаться коммутирующий транзистор 7, а на дросселе 3 наводится ЭДС, что приводит к заряду накопительного элемента 6 до установленного уровня[2].

**Заключение.** В результате анализа различных устройств по компенсации саморазряда выявлены их недостатки, снижавшие эффективность стартерных аккумуляторных батарей. Предлагаемое устройство по компенсации саморазряда стартерных аккумуляторных батарей обеспечивает индивидуальный подход по компенсации саморазряда и не зависит от электрических промышленных сетей, снижает трудозатраты по обслуживанию стартерных аккумуляторных батарей в 2-3 раза. Введение в конструкцию устройства по компенсации стартерных аккумуляторных батарей дополнительных элементов, а именно дросселя с последовательно соединенным диодом, накопительного элемента, коммутирующего транзистора, задающего генератора и порогового устройства, позволило автоматически компенсировать саморазряд. Это, несомненно, совершенствует схему устройства и позволяет обеспечить требуемое напряжение подзаряда при фотоэлементе с любым напряжением и при любом освещении, что существенно расширяет сферу применения данного устройства.

#### *Библиографический список*

1. Руководство по свинцовым аккумуляторным батареям. М.: Воениздат, 1983. – 183 с.
2. Заявка на Пат. 2011153943 А Российская Федерация, МПК H02J 7/00. Устройство для компенсации саморазряда аккумуляторных батарей. [Текст] / В.Д. Рогачев, Н.Л. Пузевич, Б.Н. Сучугов, Н.М. Шилеева; заявитель и патентообладатель Ряз. высш. возд.-дес. ком. училище; заяв. 20.07.2013; Бюл. №20. – 5 с: ил.

УДК 544.653.22

*Ю.М. Стрючкова, Г.П. Гололобов, Д.В. Суворов, С.А. Круглов***ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ МОДИФИКАЦИИ  
ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛОУГЛЕРОДА В УСЛОВИЯХ ХЕМОСОРБЦИИ  
ФТОРСОДЕРЖАЩИХ НАНОГРУПП НА ЕЕ  
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

*Методами сканирующей зондовой микроскопии исследованы электрофизические свойства поверхности стеклоуглерода (СУ) до и после ее электрохимической модификации в условиях хемосорбции фторсодержащих наногрупп. На основе полученных локальных спектральных зависимостей туннельного тока от туннельного напряжения рассчитаны значения коэффициентов, которые характеризуют локальные (на атомном уровне) электрофизические свойства поверхности. В результате фторирования поверхности СУ обнаружено изменение соотношения ее донорно-акцепторных атомных характеристик, ускорение электродных процессов и рост общей туннельной активности локальных мест.*

**Ключевые слова:** *стеклоуглерод, хемосорбция, сканирующая зондовая микроскопия.*

**Введение.** Стеклоуглерод (СУ) характеризуется уникальными свойствами, такими как высокая механическая прочность, химическая и электрохимическая инертность, газонепроницаемость, хорошая электропроводность и др. Это позволило ему получить широкое распространение в самых разнообразных областях промышленности. Хорошо известно его применение в качестве электродного материала. СУ-электроды характеризуются высокой каталитической активностью и стойкостью. Представляет интерес выяснение причин, обуславливающих подобные характеристики. Известны работы, в которых такие свойства объясняют изменением в ходе эксплуатации СУ-электрода наноструктуры его поверхности в результате модифицирующих воздействий на нее в условиях электролиза. К таким изменениям относят, например, появление функционально активных поверхностных компонент с наноразмерными группами хемосорбционного характера [1-3].

В настоящее время известно большое разнообразие методик исследования поверхности различных материалов. Очевидно, что качественно новую информацию о поверхности можно получить, используя новые методы исследования. В числе таких методов сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) и сканирующей туннельной спектроскопии (СТС). Уникальную информацию о локальных атомных свойствах

поверхности может дать метод сканирующей туннельной спектроскопии по напряжению (СТСН), который уже показал свою эффективность на примере некоторых металлов и сплавов в наших предыдущих работах, например [4,5]. Применение этого метода основано на анализе данных СТСН. На отдельных атомах поверхности получают спектры, характеризующие зависимость туннельного тока ( $I_t$ ) от туннельного напряжения ( $U_t$ ). Эмпирическим путем была выведена формула, которая адекватно описывает такие спектры [5]. Параметры, входящие в ее состав, имеют очевидный физико-химический смысл. Среди них:

– коэффициент  $\alpha$  – безразмерный коэффициент вероятности туннельного переноса электрона с образца на иглу (от 0 до 1), коэффициент  $\alpha$  отражает донорно-акцепторные свойства пары образец/игла;

– коэффициент  $\beta$  – наклон логарифмической зависимости  $U_t/\ln(I_t)$ , имеющий размерность В или мВ, – аналог тафелевского коэффициента  $b$ ; коэффициент  $\beta$  характеризует эффективное сопротивление туннельным процессам;

– коэффициент  $\gamma$  – безразмерный коэффициент, равный отношению локальной ( $G_0$ ) и заданной ( $G_1$ ) туннельной проводимости, коэффициент  $\gamma$  характеризует локальную активность поля.

**Цель работы** – с помощью методов СТМ и СТСН исследовать влияние электрохимической модификации поверхности СУ в условиях хемосорбции фторсодержащих наногрупп на ее локальные электрофизические свойства.

**Методика эксперимента.** Объектом исследования стали образцы стеклоглугерода марки СУ-2000 размером  $15 \times 15 \times 1$  мм.

Для модификации поверхности посредством электрохимического окисления в 40%-м растворе бифторида аммония использовали потенциостат ИРС-Pro.3А.

На исходной (без предварительной обработки) и модифицированной поверхности СУ с помощью сканирующего туннельного микроскопа типа «СЗМ Solver ЕС» были получены СТМ-изображения ее электронного профиля, а также сканирующие туннельные спектры по расстоянию ( $I_t, dz$ ) (для контроля качества остроты иглы) и по напряжению ( $I_t, U_t$ ) (для определения электрофизических характеристик поверхности). Для обработки результатов использовали комплекс компьютерных программ [6]. Использовали платиноиридиевые СТМ-иглы (с содержанием 25 % Ir). Все СТМ- и СТС-измерения проведены при контакте поверхности с воздухом. Основные методы измерения на вышеупомянутом туннельном микроскопе описаны в [4-6].

Измерения проведены при комнатной температуре (20-22 °С).

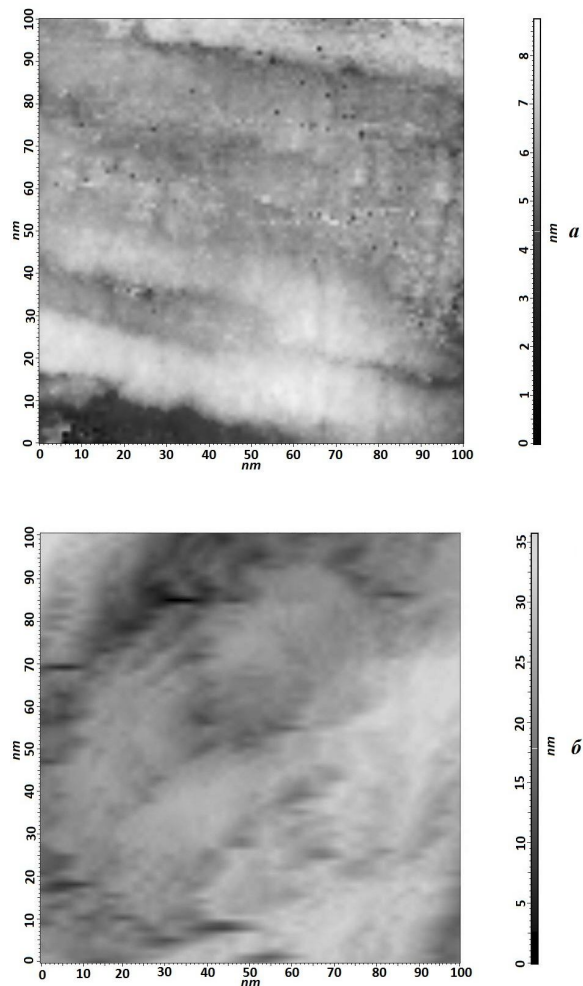
### Результаты и обсуждение.

1. Электронный профиль поверхности. Изначально поверхность СУ имела зеркально-гладкий вид. Электрохимическое окисление в 40%-м растворе бифторида аммония в течение 200 минут привело к видимому изменению поверхности СУ: она перестала быть зеркальной и стала бархатисто-черной, то есть более развитой. Это, естественно, отразилось и на ее электронном профиле.

На рисунке 1 представлены СТМ-изображения поверхности СУ без обработки (рисунок 1,а) и после такой обработки (рисунок 1,б). Нанорельеф поверхности СУ после обработки более развит, перепад высот почти в четыре раза превышает перепад высот на поверхности СУ без обработки. Это произошло в результате первичных процессов анодного растворения поверхности исходного СУ и формирования на ней более устойчивого состояния.

2. Электрофизические свойства поверхности. Методами СТСН диагностируется достаточно большой разброс электрофизических свойств атомов поверхности СУ. Это касается как необработанной, так и фторированной поверхности СУ. На рисунке 2 приведены полиго-

ны гистограмм  $I_t, U_t$ -спектроскопии для этих поверхностей. Они демонстрируют процентное распределение коэффициентов  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ , рассчитанное на основе анализа совокупности данных, полученных в результате спектроскопических измерений по напряжению. Для всех коэффициентов наблюдаются области преимущественного распределения их значений с соответствующими экстремумами (максимальная вероятность).



**Рисунок 1** – СТМ-изображения поверхности стеклоглугерода в различных условиях экспериментов.  $I_{t0}=0,5$  нА,  $U_{t0}=0.1$  В, длительность сканирования 100 с. Измерения на границе с воздухом:  
**а** – поверхность необработанного СУ на поле  $100 \times 100$  нм, перепад высот 8.7420 нм;  
**б** – после введения F-групп на поверхность СУ, поле  $100 \times 100$  нм, перепад высот 36 нм

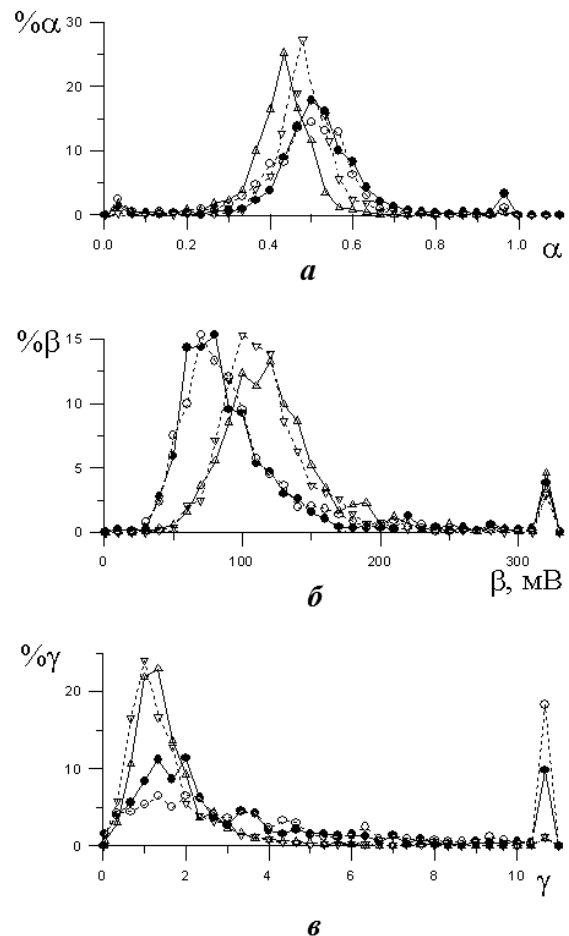
Экстремальные и средние значения  $\alpha$  для необработанного СУ на прямом ( $dU_t/dt > 0$ ) и обратном ( $dU_t/dt < 0$ ) ходе меньше 0.5. Это указывает на преимущественное преобладание на поверхности мест с акцепторными свойствами по отношению к электрону, т.е. катодно-активных участков. Вместе с тем имеются значения  $\alpha$ , превышающие 0.5, что свидетельствует о наличии мест и с донорной, т.е. анодной активностью.

Область преимущественного распределения  $\alpha$  несколько менее выражена для модифицированного СУ, кроме того, значений, выходящих за ее пределы, больше по сравнению с исходным СУ. Экстремумы прямого и обратного хода (около 18 % на прямом и 15 % на обратном ходе) находятся около 0.5, это говорит об одновременной склонности как к катодным, так и к анодным процессам значительной части атомов поверхности фторированного СУ.

Из рисунка 2 видно, что электрофизические свойства поверхности как необработанного, так и модифицированного СУ характеризуются значительной дисперсией. Для всех коэффициентов имеются значения, которые выходят за области их преимущественного распределения. Например, для  $\alpha$  имеются места на поверхности с минимальными (около 2,5 %) и максимальными (около 4 %) значениями. Значения коэффициента  $\beta$  преимущественно расположены в области 40 – 170 мВ, но также есть места на поверхности, которые характеризуются как более высокими значениями  $\beta$  (а следовательно, и большей сопротивляемостью туннельным процессам), так и меньшими значениями  $\beta$  (соответственно меньшая сопротивляемость туннельным процессам). Из рисунка 2,б видно, что поверхность фторированного СУ характеризуется меньшей сопротивляемостью туннельным процессам по сравнению с необработанным СУ, об этом говорит смещение области преимущественного распределения  $\beta$  в сторону меньших значений.

Поверхность исходного СУ характеризуется умеренной локальной активностью, об этом говорит преимущественное распределение значений коэффициента  $\gamma$  в области от 0 до 2; вместе с тем есть места на поверхности с высокой активностью ( $\gamma > 3$ ). Относительно модифицированной поверхности СУ можно сказать, что на ней имеются места, значительно отличающиеся друг от друга своей активностью, так как наблюдается значительная дисперсия значений коэффициента  $\gamma$ .

Смещение средних значений  $\alpha$  после модифицирования поверхности в сторону увеличения, а также то, что значения коэффициента  $\beta$ , отражающего не омическое сопротивление туннельного переноса электрона, стали примерно на 25 – 30 мВ меньше, означает, что локальные электрофизические свойства параметров атомов поверхности СУ стали более анодно активны. Об этом же росте туннельной активности фторированной поверхности СУ на атомном уровне свидетельствует увеличение количества значений коэффициента  $\gamma$  в областях высокой активности ( $\gamma > 3$ ).



**Рисунок 2 – Полигоны гистограмм при разбиении на 30 фрагментов по совокупности измерений в опытах на границе с воздухом на поле 100 x 100 нм, при  $I_{t0} = 0.101$  нА  $U_{t0} = 0.100$  В. Условия эксперимента: спектроскопия  $I_t, U_t$  по узлам сетки 10x10 узлов. Развертка  $U_t$  от минус 0.500 до 0.500 В со скоростью  $\pm 1.00$  и  $2.00$  В/с.**

$\Delta, \nabla$  – Поверхность СУ не обработана, по серии из 5 опытов (перепад высот от 11 до 36 нм).

$\Delta$  – при  $dU_t/dt > 0$ ;  $\nabla$  – при  $dU_t/dt < 0$  (пунктир).

$\bullet, \circ$  – измерения на поверхности СУ, модифицированной введением F-групп. По серии из 10 опытов (перепад высот 8-15 нм).

$\bullet$  – при  $dU_t/dt > 0$ ;  $\circ$  – при  $dU_t/dt < 0$  (пунктир):

**a** - процентное распределение локальных значений коэффициента вероятности переноса в туннельном контакте электрона на иглу  $\alpha$  на интервале  $0.0 \leq \alpha \leq 1.0$ ;

**б** - процентное распределение локальных значений коэффициента наклона логарифмической зависимости  $U_t/\ln(I_t)$  ( $\beta$ ) на интервале  $0.0 \leq \beta \leq 300$  мВ;

**в** - процентное распределение локальных значений отношения локальной ( $G_0$ ) и заданной ( $G_1$ ) проводимости – ( $\gamma$ ) на интервале  $0 \leq G_0 \leq 10$

**Выводы.** На основании приведенных выше результатов СТСН-измерений можно подвести некоторые итоги. Модифицирующие воздействия на стеклоуглерод путем электрохимического окисления в 40%-м растворе бифторида аммония

отражаются на электрофизических свойствах атомов поверхности. При этом происходит изменение соотношения донорных и акцепторных свойств атомов поверхности, уменьшение эффективного сопротивления туннельному переносу электрона и увеличение степени общей туннельной активности. В результате модификации поверхности увеличивается ее анодная активность.

#### **Библиографический список**

1. Андреев В.Н. Электрохимическое поведение органических соединений на композитных электродах стеклоуглерод-нафион-полианилин-частицы Pd в кислых растворах // Электрохимия. 2006. - Т. 42. - № 1. - С. 110-114.

2. Потапова Г.Ф., Касаткин Э.В., Клочихин В.Л., Путилов А.В. Электрохимический синтез неорганических перекисных соединений // XVIII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. 2007. - Т.3. - С.25.

3. Потапова Г.Ф., Касаткин Э.В., Клочихин В.Л., Путилов А.В. Углеродные материалы для электросинтеза неорганических перекисных соединений и водоподготовки // Всероссийская конференция по физической химии и нанотехнологиям «НИФХИ-90» М.: НИФХИ, 2008. - С.165-166.

4. Стрючкова Ю.М., Касаткин Э.В. ЭСТМ-исследование наноструктуры и поверхностных энергетических свойств чистых хрома и никеля // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2009. - Т. 45. - № 5. - С. 509-516.

5. Касаткин Э.В., Стрючкова Ю.М. О практике и теории измерений и исследований с использованием СТМ и ЭСТМ // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2012. - Т.48. - № 5. - С. 474-487.

6. Касаткин Э.В. Программный комплекс для исследования поверхности с помощью сканирующего туннельного микроскопа // XVIII Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» Казань. Изд. КГТУ, 2005. - Т.4.-С.144-146.

УДК 621.387

**В.Ф. Анисимов, А.С. Арефьев**

## **УСТОЙЧИВОСТЬ РАБОТЫ ХОЛОДНЫХ ТОНКОПЛЁНОЧНЫХ КАТОДОВ В ИСКРОВОМ РАЗРЯДЕ**

*Приведены результаты исследований тонкоплёночных катодов толщиной 1 мкм после воздействия токовых нагрузок 1 кА длительностью 1 мкс. Установлено, что сформированный эмиттер газонаполненного разрядника на основе тонкоплёночных катодов с толщиной слоя 1 мкм не выдерживает заданные токовые нагрузки. Это объясняется воздействием эффекта Пельтье в приграничном слое керн эмиттер.*

**Ключевые слова:** тонкоплёночный катод, дуговой разряд.

**Введение.** Общепринято делить катодные пятна дугового (искрового) разряда на три типа. На ранней стадии разряда на катоде возникают маленькие, быстро, беспорядочно и независимо друг от друга перемещающиеся пятна – катодные пятна первого рода. Размеры их  $r \sim 10^{-4}$  см, скорости  $v \sim 10^3-10^4$  см/с. Катодное пятно состоит из множества единичных пятен с плотностью тока  $10^7$  А/см<sup>2</sup> и выше [1-4]. Через время порядка  $10^{-4}$  с характер пятен меняется. Маленькие пятна объединяются в более крупные и менее подвижные ассоциации, скорости которых  $10-10^2$  см/с, это катодные пятна второго рода. Неподвижные пятна – это пятна третьего рода. Как отмечается всеми, единой теории катодных пятен до сих пор не разработано.

Существует ряд электронных приборов с тонкоплёночными покрытиями электродов, тол-

щина которых сравнима с диаметром единичного катодного пятна дуги, работающих в режимах, соответствующих дуговому режиму первого рода, т.е. быстро перемежающихся катодных пятен. Результаты воздействия таких пятен на поверхность таких электродов весьма своеобразны. Это связано с уникальными плотностями тока и энергии, локально выделяющейся на поверхности электродов.

Так, ранее проведённые исследования [1] позволили получить зависимость величины катодного падения дуги от толщины тонкоплёночных катодов. На рисунке 1 приведены экспериментальные данные по тонкоплёночным катодам из индия на вольфрамовой (1) и титановой (2) подложке. Наличие тонких плёнок толщиной  $0,015-0,115$  мкм на поверхности подложек приводило к существенно меньшим значениям ка-

тодного падения, чем на массивных, компактных электродах. Только при толщинах свыше  $2 \cdot 10^{-5}$  см катодное падение не зависит от толщины пленки, что, по мнению авторов, свидетельствует о том, что условия идентичны условиям на массивном катоде.

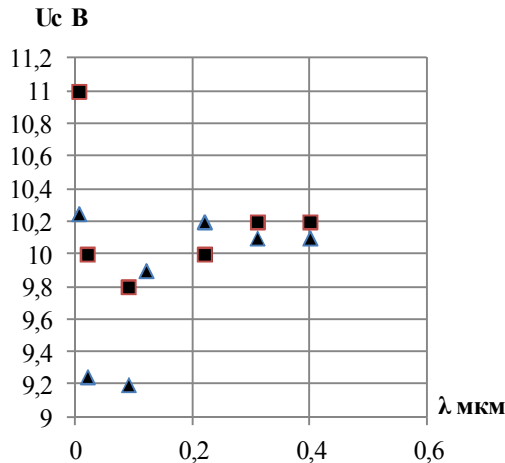


Рисунок 1 – Зависимость катодного падения дуги ( $U_c$  В) с тонкопленочным катодом из индия от толщины пленки  $\lambda$ :

□ – на вольфрамовой подложке,  
 ▲ – на подложке из титана

При рассмотрении сильноточных дуг необходимо учитывать, что благодаря значительной эрозии материала электродов при относительно малых межэлектродных расстояниях окружающая среда, жидкая или газообразная, практически полностью удаляется из промежутка.

При экспериментальном изучении любых коротких дуг, горящих между металлическими электродами, утверждают, что дуга горит практически исключительно в парах материала электродов. Вероятность ионизации  $p_i$  можно записать как

$$p_i = A \cdot \exp[(\varphi - \varphi_i)/kT],$$

где  $\varphi_i$  – потенциал ионизации,  $T$  – абсолютная температура,  $\varphi$  – энергия ионизирующих электронов и  $k$  – постоянная Больцмана.

В случае наличия в плазме дуги нейтральных атомов паров разных металлов отношение вероятностей ионизации атомов металлов может быть выражено как

$$p_1/p_2 = A \cdot \exp[(\varphi_2 - \varphi_1)/kT],$$

где  $p_1$  и  $p_2$  – вероятность ионизации металлов,  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – потенциалы их ионизации.

Если предположить, что температура плазмы дуги в случае наличия термодинамического равновесия составляет 6000–6500 К [1], вероятность ионизации металла с меньшим потенциалом ионизации атомов больше вероятности ионизации атомов с большим потенциалом иони-

зации в идентичных условиях. Причём катодное падение в основном определяет элемент с меньшим потенциалом ионизации

Учитывая свойства металлов, содержащихся в катоде, по времени деионизации рабочего промежутка можно определить, какой из металлов является определяющим для данного случая [5]. При этом предполагается глубина эрозии дуги больше толщины пленки.

Оценка полученных результатов, приведённых в [1], произведённых по вышеприведённой методике, не объясняют полученных экспериментальных данных по катодному падению для единичных катодных пятен.

Поэтому целесообразно ещё раз рассмотреть работу тонкопленочных катодов.

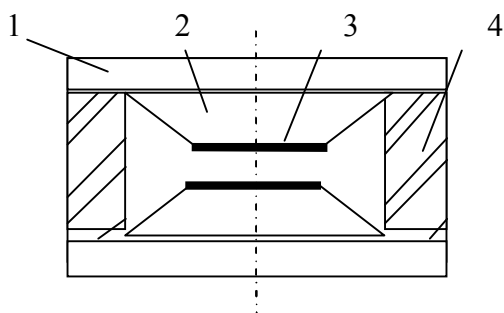
С точки зрения устойчивости работы тонкопленочных катодов в дуговом разряде интерес представляют электроды с толщиной покрытий, сравнимой с размерами единичного катодного пятна.

Целью данной работы является исследование работы разрядников с тонкопленочными катодами толщиной 1 мкм.

**Методика эксперимента.** Исследования работы тонкопленочных катодов в режимах, когда катодные пятна соответствуют пятнам первого рода, проводились на двухэлектродных бесштенгельных разрядниках (рисунок 2). Электрод прибора состоял из двух частей: никелевого керна 2 и дополнительного электрода 1, выполненного из сплава 42НАВИ, который имеет близкий коэффициент линейного расширения с применяемой керамикой. В качестве изолятора был выбран цилиндр (4) из керамики ВК 94. На никелевый kern 2 в среде аргона наносились методом катодного распыления пленки W, Mo, Ag, Cu толщиной 1 мкм (3) на рабочую часть электродов, в специальных оправках позволяющих покрывать только торец электрода. Электроды с покрытиями W и Mo до установки в прибор для получения диффузионного спая керна и поверхностного слоя отжигались в среде водорода при температуре 1300 °С. Кроме того, изготавливались макеты с чистыми (непокрытыми) электродами. Разрядник наполнялся инертным газом (аргоном) до давления 10000 Па. Разрядник герметизировался при температуре 790 °С за счёт плавления колец припоя ПСр72, помещённых на металлизированные молибдено - марганцевой пастой торцы керамического корпуса.

Разрядники испытывались в импульсном режиме с амплитудой тока 1000 А длительностью 1 мкс. На испытательном стенде макеты подвергались воздействию 100 импульсов. Со-

противление изоляции замерялось у разрядников до испытаний и после испытаний тераомметром.



**Рисунок 2 - Конструкция разрядника:**

1 – дополнительный электрод, 2 – никелевый керн, 3 – тонкоплёночное покрытие, 4 – изолирующий цилиндр

Как показали испытания экспериментальных образцов с напылёнными электродами, во всех случаях наблюдалось падение сопротивления изоляции разрядника с  $10^{12}$  Ом до  $10^7$  Ом за счёт распыления покрытия на внутреннюю поверхность изолятора. В то же время у разрядников с чистыми (непокрытыми) электродами падение сопротивления изоляции составляло  $10^{10}$  Ом.

Как отмечалось выше, в настоящей статье будут рассматриваться только пятна первого рода. Причем значения параметров катодных пятен выбираются следующими: радиус пятна  $r = 1$  мкм, скорость  $v = 10^3$  см/с, плотность тока  $10^8$  А/см<sup>2</sup> и ток единичного пятна дуги  $I \leq 2$  А [6].

**Обсуждение результатов.** Очевидно, что в исследуемых разрядниках распыление плёнок электродов связано с дополнительной энергией, выделяющейся на поверхности электродов. Очевидно, что, как и в исследованиях, проведённых в работе [1], так и в нашем случае это теплота Пельтье. В первом случае дополнительная энергия приводила к изменению напряжения катодного падения в дуговом разряде, а во втором – к срыву напылённой плёнки дуговым разрядом.

Известно, что в дуговых разрядах первого рода общее катодное пятно состоит из ассоциации малых быстро перемещающихся единичных пятен, которые имеют размеры в единицы микрон и конечное значение тока на единичное пятно. То есть при увеличении общего тока увеличивается количество единичных пятен.

При рассмотрении зоны, в которой выделяется теплота Пельтье, исходили из следующих положений – глубина эрозии катодного пятна сравнима с толщиной тонкоплёночного катода и энергия Пельтье выделяется в слое имеющим толщину десятки – сотни атомных слоёв.

Изменение температуры  $\Delta T$  в зоне переходного слоя напылённого металла и материала подложки вычисляются по формуле

$$\Delta T = Q/m \cdot c,$$

где  $Q$  – количество теплоты Пельтье,  $m$  – масса выбранного объёма,  $c$  – удельная теплоёмкость вещества.

$Q$  в свою очередь зависит от протекающего тока  $I(t)$  и равна

$$Q = P \cdot I \cdot t,$$

где  $P$  – коэффициент Пельтье, который зависит от природы находящихся в контакте материалов,  $I$  – ток единичного пятна дуги,  $t$  – время воздействия единичного пятна.

Используя справочные данные [7,8], можно оценить изменение температуры в переходном слое. В зависимости от толщины переходного слоя изменение температуры может составить от сотен до нескольких тысяч градусов.

Данное изменение температуры переходного слоя приводит к сильным термодинамическим нагрузкам и, как следствие, к срыву плёнки.

Использование в разрядниках полупроводниковых материалов, у которых эффект Пельтье выражен более сильно, например карбидов кремния, может значительно усилить эффект.

Уменьшение влияния теплоты Пельтье может быть достигнуто путём применения диффузионного отжига напылённых электродов или послойным напылением покрытий сплавами с постепенно изменяющимся процентным составом материала ядра и материала покрытия.

В работе [9–12] одним из основных требований, предъявляемых к тонкоплёночным покрытиям, толщина которых составляет единицы микрон и менее, используемых в разрядниках, работающих при коротких импульсных нагрузках, является то, что значение теплопроводности между керном и плёнкой должно быть на уровне значений теплопроводности компактных металлов, а сам переходный слой должен иметь толщину не менее десятых долей микрона.

### Выводы

1. Эффект Пельтье может приводить к срыву тонкоплёночных покрытий, используемых в исследуемых неуправляемых разрядниках.

2. Для снижения влияния эффекта Пельтье на работу разрядников с тонкоплёночными покрытиями необходимо иметь переходный слой между керном (подложкой) и напылённой плёнкой возможно большей толщины.

3. Проведённые исследования показывают принципиальную возможность получать в разрядниках, которые содержат электроды с тонкоплёночными покрытиями и работают в режимах дуговых (искровых) разрядов первого рода, эффект подогрева или охлаждения зоны единичных катодных пятен. Подобные явления должны

оказывать существенное влияние на работу данных приборов, в том числе и катодное падение, которое может быть как положительным, так и отрицательным.

### **Библиографический список**

1. Раховский В.И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме // М.: Наука, 1970. С. 257 – 260.
2. Любимов Г. А., Раховский В.И. Катодное пятно вакуумной дуги // Успехи физических наук, т.125, 1978. № 4. С. 665 – 706.
3. Кесаев И.Г. Катодные процессы электрической дуги // М.: Наука, 1968. 245 с.
4. Месяц Г.А. Эктоны, ч. 1 и 2 // Екатеринбург, УИФ «Наука», 1993 – 1994. – 185 с. 249 с.
5. Анисимов В.Ф., Гнидо В.Ф., Лоскутов А.В., Киселёв Ю.В., Тинина Е.В. О распределении заряженных частиц при распаде плазмы в условиях равномерного распределения зарядов в промежутке // Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии. 2001. № 8. С. 99 – 102.
6. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Ус-

тановившийся ток // М.: Наука. 1970. 358 с.

7. Кикоин И.К. Таблицы физических величин // М.: Атомиздат, 1976. 466 с.

8. Григорьев И. С., Мейлихов Е.З. Физические величины // М.: Энергоатомиздат, 1991. 560 с.

9. Анисимов В.Ф., Киселёв Ю.В., Круглова Е.В., Юдаев Ю.А. Исследование новых эмиссионных материалов в неуправляемых газонаполненных разрядниках // Известия Академии наук, серия физическая. Т.64, 2000. №7. С. 1335 – 1339.

10. Анисимов В.Ф., Арефьев А.С. Метод вакуумного напыления для формирования сплавных вторично-эмиссионных покрытий // Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА №1 (87), 2011. С. 16 – 19.

11. Анисимов В.Ф., Гнидо В.Ф., Киселёв Ю.В., Тинина Е.В. Разработка и исследование материалов для катодов защитных разрядников // Вестник Рязанской радиотехнической академии. 2001. № 9. С. 118 – 121.

12. Анисимов В.Ф., Арефьев А.С. Особенности технологии тонкопленочных эмиттеров для газоразрядных приборов и источников света // Вакуумная техника и технология Т.21. 2011. №1. С. 35 – 39.

УДК 004.9

**О.О. Голубятников, В.В. Дубровин**

## **МОДЕЛЬ ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЗДОРОВЬЯ**

*Рассмотрена модель экспресс-оценки состояния здоровья, которая входит в структуру автоматизированной информационной системы экспресс-оценки состояния здоровья человека в период акклиматизации.*

**Ключевые слова:** экспресс-оценка состояния здоровья, формальная модель.

**Введение.** У граждан из различных климато-географических регионов, среди которых подавляющее большинство составляют иностранные граждане, в связи со сменой климатических условий проживания, стрессорным влиянием учебной/рабочей деятельности и воздействием других социальных факторов повышается риск возникновения различных заболеваний, в том числе и инфекционных. Кроме того, часто отсутствуют какие-либо сведения об исходном состоянии их здоровья, а экспресс-оценка состояния здоровья иностранных граждан вызывает особые затруднения, связанные с языковыми, организационными и другими проблемами. Вместе с тем специалисты предметной области сталкиваются с проблемами автоматизации проводимых исследований, мониторинга, апробации методик оценки, обработки полученных данных [1]. Разрабатываемая авторами автоматизиро-

ванная информационная система (АИС) экспресс-оценки состояния здоровья человека в период акклиматизации способна решить подобные задачи [2]. Апробации методик является одной из важнейших задач для специалиста предметной области (эксперта) [1]. Для выбора, добавления существующих и помощи эксперту в создании новых методик экспресс-оценки целесообразна разработка режима ввода знаний [3]. Для реализации данной задачи возникает необходимость формализации содержания и структуры экспресс-оценки состояния здоровья.

*Цель работы* – формализация экспресс-оценки для автоматизированной информационной системы экспресс-оценки состояния здоровья человека в период акклиматизации.

**Формализация содержания экспресс-оценки состояния здоровья**

Содержание экспресс-оценки состояния



здоровья характеризуется методиками, входящими в состав экспресс-оценки. Пусть  $M$  – множество методик экспресс-оценки, которые можно применить в данной предметной области. Множество методик  $M$  экспресс-оценки можно разбить на две составляющие  $M \supseteq (T, П)$ , где  $T$  – методики, которые представляют собой субъективные тесты-опросники, состоящие из вопросов с ответами в виде текстовой или графической информации (шкала ответов). Например, текстовая информация может быть представлена в виде выбора вариантов ответов из нескольких предложенных (рисунок 1), а графическая – в виде шкалы ответов (рисунок 2);

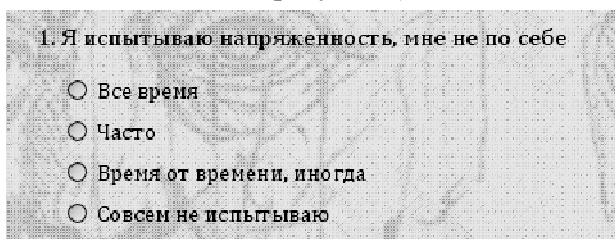


Рисунок 1 – Пример вариантов ответов методик  $T$  в виде текстовой информации

$П$  – методики, использующие объективные показатели приборов измерения, в которых могут применяться центильные таблицы для определения количественных оценок состояния здоровья.

Совокупность методик  $M$  можно разбить на блоки по каким-либо параметрам, например по принадлежности к определенным физиологическим системам организма, а каждый блок – на подблоки.



Рисунок 2 – Пример шкалы ответов методик  $T$

Если блок содержит только одну методику, то подблоков нет.

Методики  $T$  и  $П$  характеризуются подмножествами:

$$T \supseteq (I, W, L, \Phi, S, Z);$$

$$П \supseteq (I, \Psi, \Theta, \Phi, S, Z),$$

где  $I$  – название методик, блоков, подблоков, инструкции к методикам, справочная информация;

$W$  – тестовые задания методик, вопросы, варианты ответов;

$L$  – различные показатели для методик  $T$ ,

использующих шкалы в качестве тестовых заданий: величина деления шкалы, имена делений, метки шкалы и т.д.;

$\Psi$  – показатели приборов измерения: прибор измерения, измеряемый показатель, размерность показателя и т.д.;

$\Phi$  – формулы, алгоритмы определения количественной оценки на основе первичных данных;

$\Theta$  – центильные таблицы, используемые для определения количественных оценок  $Y$  на основе показателей приборов измерения из  $\Psi$  и первичных данных;

$S$  – показатели оценки состояния здоровья, определяемые на основе использования формул  $\Phi$  и первичных данных;

$Z$  – критерии оценки (диапазоны баллов, шкалы, на основе которых формируется оценка состояния здоровья субъекта  $U$ ), заключения, рекомендации, диагнозы.

Определение атрибутов подмножеств будет произведено на стадии формализации базы знаний АИС и разработки реляционных моделей данных.

**Формализация структуры экспресс-оценки состояния здоровья.** Реализацию процесса экспресс-оценки можно разделить на три этапа, выполняющихся последовательно (рисунок 3).

На первом этапе происходит реализация оператора  $D_U(U, S)$ , который применяется к субъекту  $U$  (пользователю) и показателю  $S$  экспресс-оценки для получения множества значений  $X$ :

$$X = D_U(U, S).$$

Множество показателей  $S$  включает в себя два подмножества:

$$S \supseteq (S_B, S_M),$$

где  $S_B$  – подмножество показателей, идентифицирующих субъекта  $U$ , т.е. биографические данные пользователя. Часть показателей  $S_B$  используются для вычисления количественных оценок состояния здоровья, например в центильных таблицах, а часть является справочной информацией и применяется для формирования заключения и рекомендаций;

$S_M$  – подмножество показателей оценки состояния здоровья, относящихся к методикам  $M$ .

Множество показателей  $S$  должны отражать полноту отображения субъекта  $U$  с позиции предметной области.

Выполнение оператора  $D_U$  осуществляется аппаратно-программными средствами АИС в соответствии с методикой  $M$  экспресс-оценки и процедурной моделью  $P_j$ .  $P_j \in P$ , где  $P = \{P_1,$

$P_2, \dots, P_j, \dots, P_J$  – множество, состоящее из  $J$ -процедур.

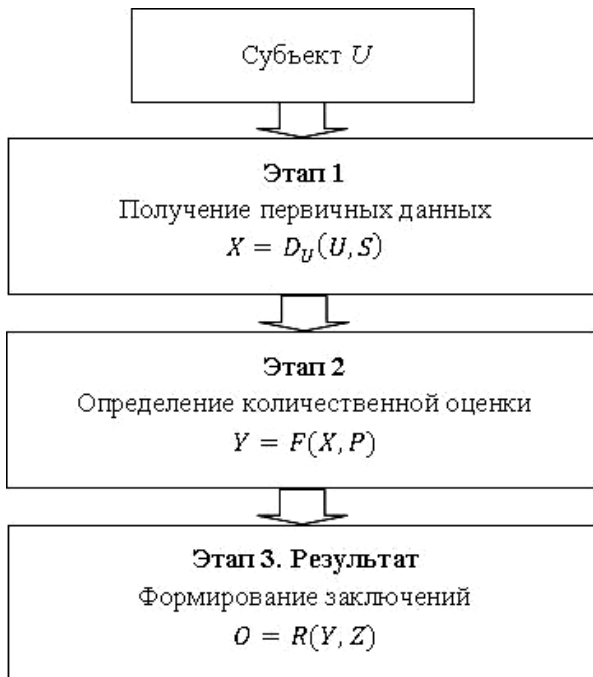


Рисунок 3 – Формальная модель процесса экспресс-оценки

На втором этапе экспресс-оценки предполагается определение количественной оценки, которая представляет собой числовые значения или баллы, набранные субъектом  $U$  в ходе проведения экспресс-оценки:

$$Y = F(X, P).$$

Оператор  $F$  реализует выбранную процедурную модель  $P_j$  для множества значений  $X$ .

На третьем этапе экспресс-оценки субъект  $U$  получает сведения, характеризующие состояния его здоровья, и рекомендации по осуществлению мероприятий для улучшения текущего его состояния.

Для формирования заключений и рекомендаций  $O$  используется оператор  $R$ , который преобразует количественные оценки  $Y$  и выбранные значения из множества  $Z$ :

$$O = R(Y, Z),$$

$$Z \ni (Z_B, Z_3, Z_D, Z_P),$$

где  $Z_3$  – заключения, характеризующие принадлежность субъекта  $U$  к одной из групп здоровья;

$Z_B$  – оценочные шкалы, диапазоны числовых значений (баллов), определяющие переход одного состояния здоровья субъекта  $U$  в другое;

$Z_D$  – диагнозы, которые однозначно определяются на основании первичных данных;

$Z_P$  – рекомендации.

В качестве примера рассмотрим реализацию методики Хит-Картера для показателя  $S =$  «Определение соматотипа». Процедура  $P_j$  для данного показателя будет следующей.

1. Получение первичных данных  $X$  в виде антропометрических измерений 11 признаков телосложения: длины и массы тела, поперечных диаметров надмышцелков плеча и бедра, окружности плеча и голени, жировых складок на передней и задней поверхностях плеча, на голени, подлопаточной и верхнеподвздошной областях.

2. Определение количественных оценок компонентов: эндоморфии  $E_n$ , мезоморфии  $M_z$ , эктоморфии  $E_k$ :

$$а) E_n \text{ равен } \sum_i E \in (q_n; q_k),$$

где  $\sum_i E$  – сумма толщины жировых складок;

$q_n$  и  $q_k$  – начальные и конечные значения интервала центиля из подмножества  $\Theta$ ;

$$б) M_z = \sum_i G/8,$$

где  $\sum_i G$  – сумма отклонений (в баллах) показателей диаметров мышцелков плеча, бедра и "обезжиренных" обхватов плеча и голени;

$$в) E_k \text{ равен } \frac{X_p}{\sqrt[3]{X_v}} \in (q_n; q_k),$$

где  $X_p$  – рост субъекта  $U$ ;

$X_v$  – вес субъекта  $U$ .

3. Тип телосложения испытуемого кодируют комбинацией трех цифр, характеризующих компоненты эндо-, мезо- и эктоморфии (например, 3-5-4), по наибольшей из которых устанавливался наиболее выраженный компонент телосложения.

4. Формирование заключений в виде соотношения эктоморфного, мезоморфного и эндоморфного компонентов телосложения и рекомендации.

**Заключение.** Наличие результатов экспресс-оценки позволяет определить следующие задачи:

- прогноз состояния здоровья субъекта  $U$  на основе ретроспективного анализа;

- текущая и прогнозная оценки состояния здоровья для групп субъектов, определяемых по каким-либо признакам, в частности климато-географическим – интеграция оценок  $Y(t)$  и  $Y(t+\Delta t)$  для определенного признака субъекта  $U$  [4]. Дальнейшая работа заключается в формализации режимов ввода знаний АИС и обработки результатов экспресс-оценки.

#### Библиографический список

1. Гулин А.В., Шутова С.В., Григорова Л.И., Муравьева И.В., Белов Р.Н., Туманян А.А. Комплексная оценка здоровья иностранных граждан. Тамбов: Издат. дом ТГУ им. Г.Р. Державина, 2010. 55 с.

2. Голубятников О.О., Шутова С.В., Дубровин В.В. Создание автоматизированной информационной системы оценки состояния здоровья иностранных студентов // Вестник тамбовского университета.

Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2012. Т. 17. Вып. 4. С. 1306-1314.

3. Голубятников О.О., Дубровин В.В., Остапенко О.А. Экспертная система экспресс-оценки состояния здоровья // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 48. С. 102-106.

4. Чернышева М.Л., Лебедев В.В., Османов Э.М., Чернышев А.В. Моделирование и прогнозирование риска бесплодия у мужчин и пути совершенствования медицинской помощи мужчинам с нарушениями репродуктивного здоровья. – Саратов: Индиго-АйТи, 2011. – 215 с.