DOI: 10.22184/1992-4178.2020.197.6.106.108

Сравнительный анализ вольт-амперных характеристик ионоселективных полевых транзисторов с мембранами на основе оксидов тантала, ниобия и титана

А. Камышева[1]

УДК 504.064.38:621.382.323 | ВАК 05.11.13

Проблема загрязнения природных водоемов сточными водами становится в наши дни всё более актуальной. Соответственно, всё более важными становятся поиск эффективных способов и разработка приборов для определения степени загрязнения природных вод и стоков производственных и коммунальных объектов. Полупроводниковые технологии предлагают разнообразные устройства для решения этой задачи на современном уровне; одним из перспективных видов таких устройств являются датчики загрязнений на основе ионоселективных полевых транзисторов (ИСПТ). В ходе разработки опытной технологии изготовления тестовых образцов для лабораторных испытаний автором статьи был проведен сравнительный анализ вольт-амперных характеристик ИСПТ с мембранами на основе оксидов ниобия, тантала и титана.

Характерным элементом ИСПТ, определяющим его селективные свойства, является мембрана, при помощи которой и происходит определение степени загрязнения. Мембрана представляет собой открытый слой диэлектрика в области затвора. В данной работе исследовались ИСПТ с индуцированным каналом p-типа с мембранами на основе оксидов ниобия, тантала и титана, способные выявлять загрязнения по отклонениям значения водородного показателя (pH) воды. Датчики, построенные на основе таких ИСПТ, могут быть использованы в системах мониторинга качества воды для быстрого выявления наличия в ней загрязняющих веществ и точного определения их концентрации. Информация, полученная от таких датчиков, позволит оперативно принять решение по режиму пользования водоемом (либо прекращению сброса стоков) и при необходимости провести уточненный анализ для выявления конкретного загрязнителя, в том числе с помощью датчиков на базе ИСПТ с мембранами из других материалов.

[1] Филиал ПАО «Газпром газораспределение Ростов-на-Дону» в г. Таганроге, специалист по охране труда, a.khlebinskaya@mail.ru.

В работе проведен расчет вольт-амперных характеристик (ВАХ) ИСПТ указанных выше типов с целью прогнозирования и сравнения их параметров.

В первую очередь требовалось определить границу линейного участка ВАХ ИСПТ, для чего был произведен расчет порогового напряжения транзистора на переходе затвор-исток $U_{зи\ пор}$, при котором канал окажется перекрытым слоем объемного заряда. Расчет производился по следующей формуле:

$$U_{зи\ пор} = U_{пл.\ з} - \frac{Q_п}{C_д} + 2 \cdot \varphi_F, \quad (1)$$

где $Q_п$ – заряд неподвижных ионизированных акцепторов в полупроводнике; $C_д$ – удельная емкость диэлектрика; φ_F – положение уровня Ферми относительно середины запрещенной зоны; $U_{пл.\ з}$ – напряжение плоских зон.

Величины, входящие в выражение (1), рассчитываются следующим образом.

Напряжение плоских зон по формуле

$$U_{пл.\ з} = \varphi_{мем-п} - \frac{Q_s}{C_д} - \frac{1}{C_д} \cdot \int_0^d \frac{x}{d} \cdot Q_д(x)\,dx, \quad (2)$$

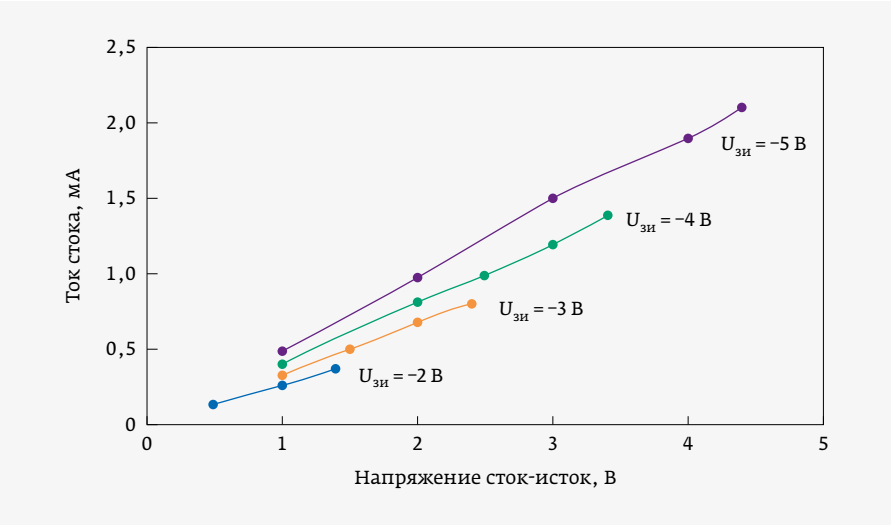

Рис. 1. Зависимость тока стока от напряжения сток-исток для транзистора с мембраной на основе оксида тантала

где $\varphi_{мем-п}$ – напряжение поля, уравновешивающее разность работ выхода электронов из мембраны и полупроводника; Q_S – поверхностный заряд вблизи границы раздела «диэлектрик – полупроводник»; $Q_д(x)dx$ – плотность заряда в диэлектрике в слое dx; d – толщина диэлектрика [1].

Положение уровня Ферми по формуле

$$\varphi_F = \frac{kT}{q}\ln\frac{N_A}{n_i}, \qquad (3)$$

где k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; q – заряд; N_A – концентрация легирующей примеси в подложке; n_i – собственная концентрация носителей тока.

Удельная емкость диэлектрика по формуле

$$C_д - \frac{\varepsilon_i}{d}, \qquad (4)$$

где ε_i – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика [2].

Расчеты показали, что значение порогового напряжения у транзисторов с мембранами всех трех видов практически одинаково и составляет –0,6 В.

Ток стока для выбранных значений $U_{си}$ рассчитывался следующим образом:

$$I_c = \frac{b}{l}\mu\left(U_{зи} - U_{пл.з} - \varphi_{м-р} - \varphi_{з-р}\right)\cdot U_{си}, \qquad (5)$$

где b – ширина канала; l – длина канала; μ – подвижность носителей заряда в канале; $U_{зи}$ – напряжение «затвор – исток»; $\varphi_{з-р}$ – потенциал на границе раздела «затвор – раствор»; $\varphi_{м-р}$ – потенциал на границе раздела «мембрана – раствор», который вычислялся по формуле (уравнение Нернста) [3]:

$$\varphi_{м-р} = \varphi_0 - \frac{RT}{4F}\ln c, \qquad (6)$$

где R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура; φ_0 – стандартный электродный потенциал, который зависит от природы материала мембраны; F – число Фарадея; c – концентрация ионов водорода.

Расчеты производились в линейной области ВАХ, когда канал не перекрыт слоем объемного заряда, в равных условиях для транзисторов с мембранами всех трех типов, при концентрации ионов водорода 10^{-14} моль / л,

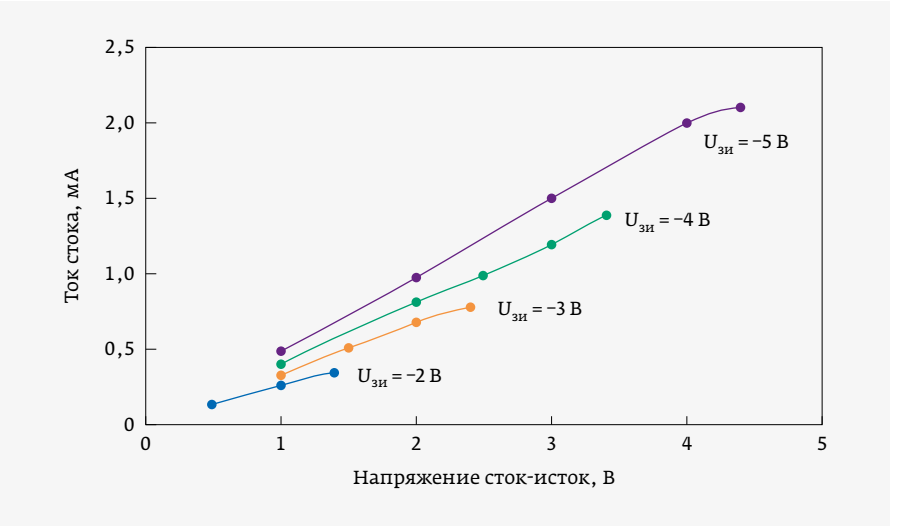

Рис. 2. Зависимость тока стока от напряжения сток-исток для транзистора с мембраной на основе оксида ниобия

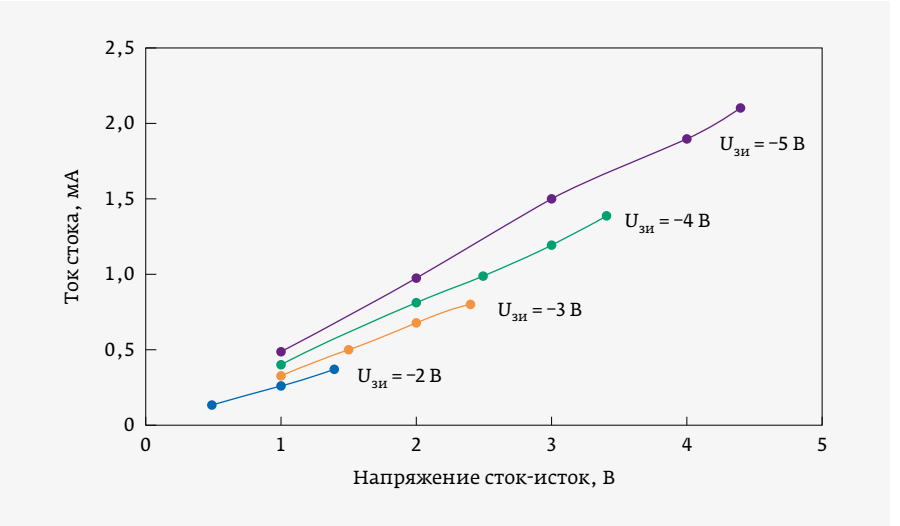

Рис. 3. Зависимость тока стока от напряжения сток-исток для транзистора с мембраной на основе оксида титана

для значений напряжения на затворе от –2 до –5 В с шагом 0,5 и 1 В. По результатам расчетов были построены графики зависимости тока стока от напряжения сток-исток для ИСПТ с мембранами на основе оксидов ниобия, тантала и титана (рис. 1–3).

Графики показывают, что в указанных условиях для всех ИСПТ зависимости I_c от $U_{си}$ весьма близки, а при напряжении сток-исток, равном 4,3 В, ток одинаков и равен 2,1 мА. Значение $U_{си}$ = 4,3 В следует рекомендовать как близкое к рабочему при штатной эксплуатации датчика, поскольку при меньших напряжениях уменьшается величина тока I_c, который фактически является выходным сигналом транзисторного сенсора, а существенное превышение этого значения переводит транзистор в режим насыщения.

Таким образом, установлено, что данные ИСПТ дают одинаковый отклик на ионы водорода даже при очень низкой их концентрации. Измеряя ток стока при постоянном затворном напряжении, можно определять концентрацию ионов водорода. Транзисторы с мембранами на основе оксидов ниобия, тантала и титана дают одинаковые результаты в плане pH-чувствительности и могут с равным успехом быть использованы в качестве чувствительного элемента в приборах для измерения водородного показателя природных и сточных вод.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Зятьков И. И., Максимов А. И., Мошников В. А.** Сенсоры на основе полевых транзисторов. Учебное пособие. – СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2002. 55 с.
2. **Зи С.** Физика полупроводниковых приборов. Ч. 1 / Пер. с англ.; под ред. д. ф.-м.н. Р. А. Суриса. – М.: Мир, 1984. 456 с.
3. **Чирок Л. М.** Математическая модель электрохимического датчика растворенного кислорода на основе МДП-транзистора // Вестник Брянского технического университета, 2006, № 1(9), С. 84–86.

IX ВСЕРОССИЙСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ

ЭКБ

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ КАЧЕСТВЕННОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗОЙ

10–11 СЕНТЯБРЯ 2020 ГОДА
ГОРОД МОСКВА

Для участия в конференции* необходимо направить заявку в Организационный комитет **не позднее 04.09.2020 г.**

Организационный комитет:
АО «ТЕСТПРИБОР»
Телефон/факс: (495) 657-87-37
E-mail: tp@test-expert.ru

ТЕСТПРИБОР

РОСЭЛ

Координационный совет разработчиков и производителей РЭА, ЭКБ и продукции машиностроения

ПРОГРЕСС
НИИ микроэлектронной аппаратуры

** Участие в конференции платное.*
За подробной информацией о программе конференции, пожалуйста, обращайтесь в Организационный комитет.