

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

А. Камышева<sup>1</sup>

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.

**Х**арактерным 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 р-типа с мембранами на основе оксидов ниобия, тантала и титана, способные выявлять загрязнения по отклонениям значения водородного показателя (рН) 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.

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:

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

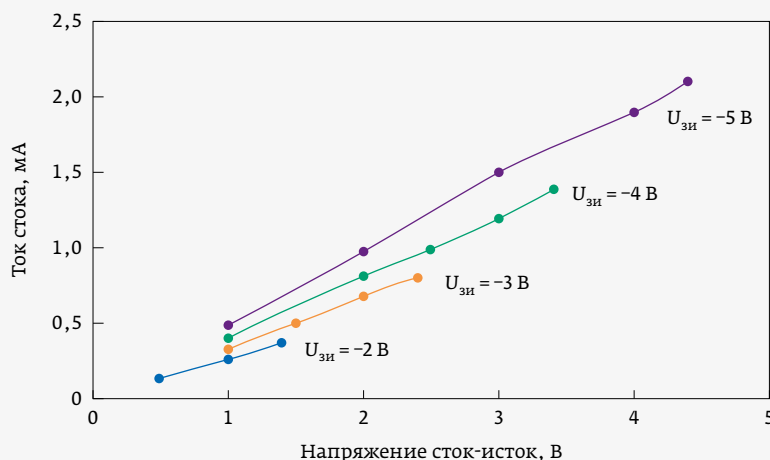
где  $Q_d$  – заряд неподвижных ионизированных акцепторов в полупроводнике;  $C_d$  – удельная емкость диэлектрика;  $\varphi_F$  – положение уровня Ферми относительно середины запрещенной зоны;  $U_{пл.з}$  – напряжение плоских зон.

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

Напряжение плоских зон по формуле

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

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



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

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

Положение уровня Ферми по формуле

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

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

$$C_d = \frac{\epsilon_i}{d}, \quad (4)$$

где  $\epsilon_i$  – 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  $U_{\text{зи}}$  рассчитывался следующим образом:

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

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

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

где  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – абсолютная температура;  $\varphi_0$  – стандартный электродный потенциал, который зависит от природы материала мембраны;  $F$  – число Фарадея;

$c$  – концентрация ионов водорода.

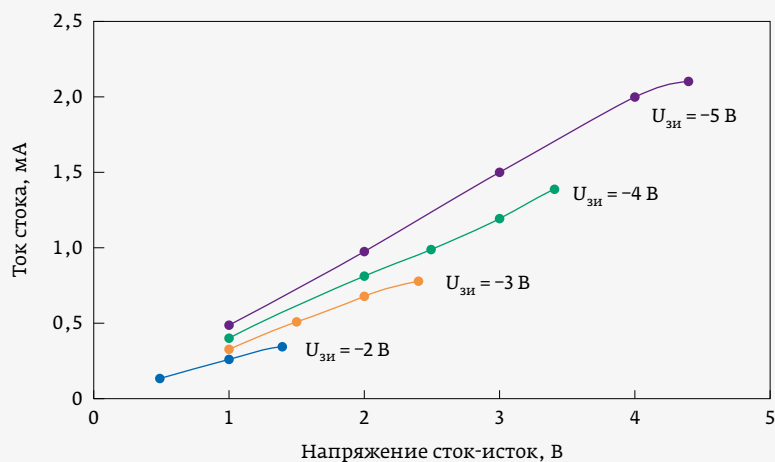
Расчеты производились в линейной области ВАХ, когда канал не перекрыт слоем объемного заряда, в равных условиях для транзисторов с мембранами всех трех типов, при концентрации ионов водорода  $10^{-14}$  моль/л,

## ООО «Руднев-Шиляев»

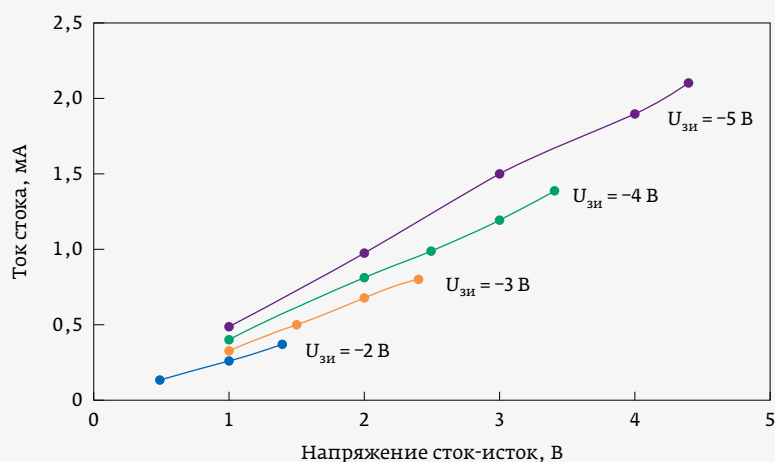
- разработка измерительных систем по техническому заданию Заказчика.
- помощь в составлении технического задания Заказчика.
- производство измерительных систем.
- разработка и производство приборов.
- разработка программно-аппаратного обеспечения по ТЗ Заказчика.
- сертификация измерительных систем и приборов.

### Инструментальные решения задач заказчика!

125130, г. Москва, ул. Клары Цеткин, д. 33 корп. 35  
www.rudshel.ru, e-mail: adc@rudshel.ru  
тел./факс: (495) 787-6367, 787-6368



**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. **Зятыков 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.

# ООО СМП

ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИН  
**www.SMD.ru**

## электронные компоненты для поверхностного монтажа

**НОВое в ПРОГРАММЕ ПОСТАВОК**

- Катушки индуктивности на токи до 10 А
- U.FL разъемы и pigtail со SMA

Москва, Ленинградский пр., 60 к. 32; e-mail: [kale@smd.ru](mailto:kale@smd.ru)  
 Тел.: (495) 158-7396, (495) 943-6244, (495) 943-8780



IX ВСЕРОССИЙСКАЯ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ  
К О Н Ф Е Р Е Н Ц И Я

**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](mailto:tp@test-expert.ru)



Координационный  
совет разработчиков  
и производителей  
РЭА, ЭКБ и продукции  
машиностроения



**ПРОГРЕСС**  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР  
МАКРОЭЛЕКТРОННОЙ АТТЕСТАЦИИ

\* Участие в конференции платное.

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