

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИОНОСЕЛЕКТИВНЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Проведён сравнительный анализ вольт-амперных характеристик ионоселективных полевых транзисторов для обеспечения экологической безопасности.

Ключевые слова: вольт-амперные характеристики, экологическая безопасность.

A.S. Kamysheva, L.P. Mileshko

COMPARATIVE ANALYSIS OF CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTIC OF ION-SELECTIVE FIELD-EFFECT TRANSISTORS FOR ENSURING ECOLOGICAL SAFETY

Comparative analysis of current-voltage characteristic of ion-selective field-effect transistors for ensuring ecological safety was carried out.

Key words: current-voltage characteristics, ecological safety.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 18 июня 2017 г.

В работе [1] была обозначена проблема значительного ухудшения качества питьевой воды, что связано с влиянием человека на окружающую среду. Для определения загрязнения природных и сточных вод используют ионоселективные полевые транзисторы, которые помогут решить множество задач в области обеспечения экологической безопасности.

В последнее время ведётся интенсивная разработка **ионоселективных полевых транзисторов (ИСПТ)** на структурах металл-диэлектрик-полупроводник для мониторинга водных объектов.

Открытый слой диэлектрика в области затвора является чувствительным элементом и обеспечивает преобразование активности протонов в растворе в электрический сигнал. В качестве диэлектрика используют оксид кремния, нитрид кремния, а также оксиды различных металлов (например, Al_2O_3 , Ni_2O_5 , Ta_2O_5).

Выбор подзатворного диэлектрика является основной задачей проектирования ионоселективных полевых транзисторов.

Одним из перспективных способов формирования подзатворного диэлектрика является анодное электролитическое легирование фосфором термических оксидных плёнок кремния наноразмерной толщины [2].

В качестве другого метода получения подзатворного диэлектрика может использоваться также реанодирование анодных оксидных плёнок в легирующих электролитах [3].

Для выбора режимов изготовления областей истока и стока можно воспользоваться результатами исследований, приведёнными в работе [4].

Кроме того, при разработке ИСПТ актуальной задачей является моделирование их *вольт-амперных характеристик (ВАХ)*, позволяющее прогнозировать параметры этих транзисторов.

В данной статье проведён сравнительный анализ ВАХ ИСПТ МОП-транзисторов при равной концентрации ионов водорода, с мембранами на основе оксидов алюминия, ниобия и тантала с индуцированным каналом *p*-типа [5, 6].

Первоначальным этапом моделирования вольт-амперных характеристик МОП транзистора является расчёт порогового напряжения транзистора, при котором канал окажется перекрытым слоем объёмного заряда, по следующей формуле:

$$U_{\text{ЗИпор}}^* = U_{\text{пл.з}}^* - \frac{Q_n}{C_D} + 2 \cdot \varphi_F, \quad (1)$$

где Q_n – заряд неподвижных ионизированных акцепторов в полупроводнике;
 C_D – удельная ёмкость диэлектрика;
 φ_F – положение уровня Ферми относительно середины запрещённой зоны;

$U_{\text{пл.з}}$ – напряжение плоских зон, которое рассчитывается по формуле:

$$U_{\text{пл.з}}^* = \varphi_{\text{мем-п}} - \frac{Q_S}{C_D} - \frac{1}{C_D} \cdot \int_0^d \frac{x}{d} \cdot Q_D(x) dx, \quad (2)$$

где Q_S – поверхностный заряд вблизи границы раздела "диэлектрик – полупроводник";

$Q_D(x) dx$ – плотность заряда в диэлектрике в слое dx ;

d – толщина диэлектрика [7];

$$\varphi_F = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i},$$

где k – постоянная Больцмана;

T – абсолютная температура;

q – заряд;

N_A – концентрация легирующей примеси в подложке;

n_i – собственная концентрация носителей тока;

$$C_D = \frac{\varepsilon_i}{d},$$

где ε_i – проницаемость диэлектрика;

d – толщина слоя диэлектрика [8].

Тогда выражение для тока стока будет выглядеть следующим образом:

$$I_c = \frac{b}{l} \mu (U_{\text{ЗИ}} - U_{\text{пл.з}}^* - \varphi_{\text{м-р}} - \varphi_{\text{р-м}}) \cdot U_{\text{СИ}}, \quad (3)$$

где b – ширина канала;

l – длина канала;

μ – подвижность носителей заряда в канале (1);

$\varphi_{м-р}$ – потенциал на границе раздела "раствор – мембрана" вычисляли по формуле [9]:

$$\varphi_{м-р} = \varphi_0 - \frac{RT}{4F} \ln c.$$

По результатам расчётов были построены зависимости тока стока от напряжения сток-исток при концентрации ионов водорода, равной 10^{-14} моль/л для различных значений напряжения на затворе в области линейной зависимости, когда канал не перекрыт слоем объёмного заряда. Ниже представлены графики вышеуказанных зависимостей для ИСПТ с мембранами на основе оксидов алюминия, ниобия и тантала.

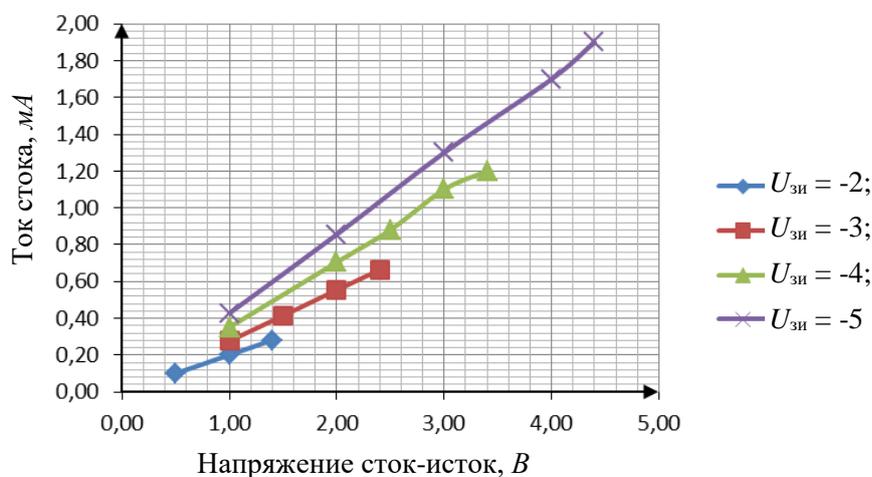


Рис. 1. Зависимость тока стока от напряжения сток-исток для транзистора с мембраной на основе оксида алюминия

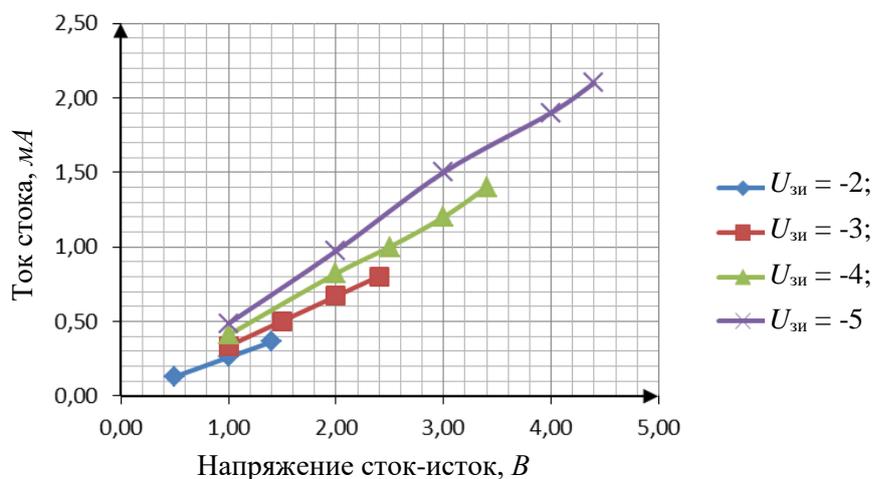


Рис. 2. Зависимость тока стока от напряжения сток-исток для транзистора с мембраной на основе оксида тантала

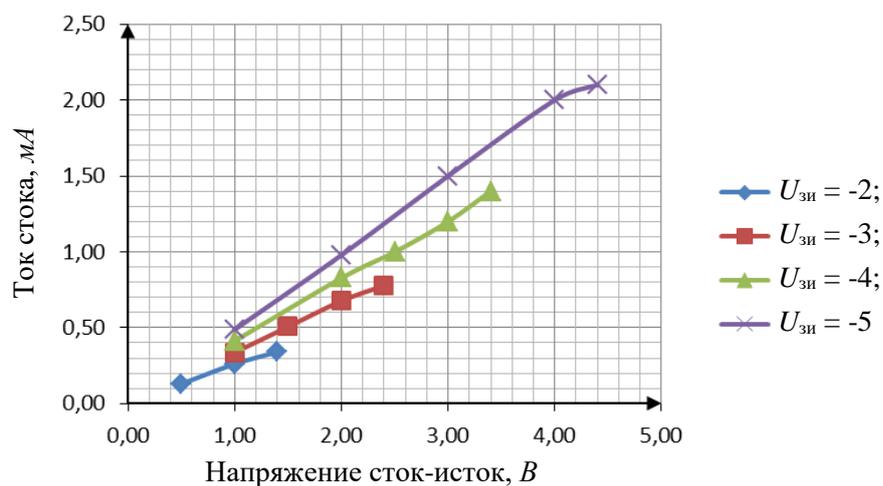


Рис. 3. Зависимость тока стока от напряжения сток-исток для транзистора с мембраной на основе оксида ниобия

Вышеприведённые графики показывают, что при фиксированной концентрации ионов водорода, равной 10^{-14} моль/л, затворном напряжении -5 В, напряжении сток-исток $4,4$ В для ИСПТ с мембраной на основе оксида алюминия $I_c = 1,9$ мА, а для ИСПТ на основе ниобия и тантала ток одинаков и равен $2,1$ мА, то есть данные транзисторы дают лучший отклик на ионы водорода даже при очень низкой концентрации.

Таким образом, на поверхности полупроводника индуцируется канал, проводимость которого будет увеличиваться с ростом отрицательного напряжения на затворе.

Сила тока, проходящего между истоком и стоком, определяется входным напряжением.

Установлено, что с увеличением отрицательного затворного напряжения и ростом положительного напряжения сток-исток растёт ток стока, пока канал не окажется перекрытым слоем объёмного заряда.

Исследуемый раствор контактирует с ионоселективной мембраной, что приводит к возникновению на поверхности мембраны потенциала, который определяет силу тока между стоком и истоком. Сила тока, в свою очередь, зависит от мембранного потенциала, который зависит от активности ионов в исследуемом растворе.

Для того, чтобы проследить зависимость силы тока от концентрации ионов были построены графики для 3-х различных транзисторов в диапазоне концентраций ионов водорода, равных 10^{-1} - 10^{-14} моль/л.

Установлено, что чем выше концентрация ионов водорода, тем меньше ток стока, то есть для измерения высоких концентраций (щелочных растворов) следует подавать большее напряжение на затвор и исток, чтоб зарегистрировать изменения тока стока, для измерения небольших концентраций (кислых растворов) нет необходимости подавать высокие напряжения.

Таким образом, установлено, что при высокой концентрации ионов водорода все три транзистора дают одинаковый результат по чувствительности, а при низкой, равной 10^{-13} моль/л, различия существенны и ток стока начинает отличаться и для транзистора с мембраной на основе оксида алюминия составляет 1,3 мА, а для двух остальных – 1,4 мА.

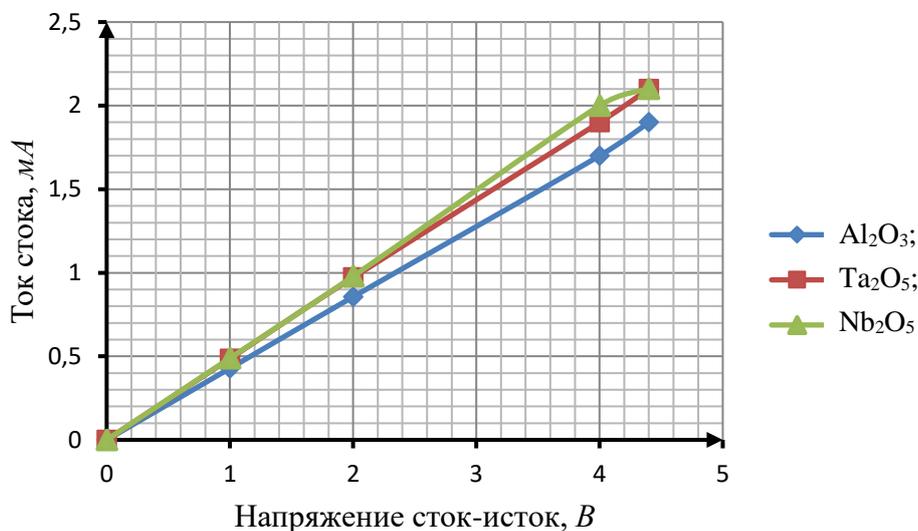


Рис. 4. Зависимость тока стока от напряжения сток-исток для транзисторов с мембранами на основе оксидов Al, Ta, Nb

Рис. 4 наглядно показывает, что лучший результат в плане *pH*-чувствительности показывают ИСПТ с мембраной на основе оксида ниобия и тантала – при концентрации ионов водорода, равной 10^{-14} моль/л и постоянном затворном напряжении $U_{зи} = -5$ В, $I_{c(Nb)} = I_{c(Ta)} = 2,1$ мА. ИСПТ с мембраной на основе оксида алюминия незначительно уступает данным транзисторам – $I_{c(Al)} = 1,9$ мА.

Выводы

Таким образом, измеряя ток стока при постоянном затворном напряжении можно измерять концентрацию ионов водорода.

Установлено, что с увеличением отрицательного затворного напряжения и ростом положительного напряжения сток-исток растёт ток стока до некоторой величины, пока канал не окажется перекрытым слоем объёмного заряда.

Приведённые иллюстрации наглядно показывают, что чем выше концентрация ионов водорода, тем меньше ток стока, то есть для измерения высоких концентраций (щелочных растворов) следует подавать большее напряжение на затвор и исток, чтоб зарегистрировать изменения тока стока; для измерения небольших концентраций (кислых растворов) нет необходимости подавать высокие напряжения.

Лучший результат в плане *pH*-чувствительности показывают ИСПТ с мембраной на основе оксида ниобия и тантала – при концентрации ионов водорода 10^{-14} моль/л и постоянном затворном напряжении $U_{зи} = -5$ В, $I_{c(Nb)} = I_{c(Ta)} = 2,1$ мА. ИСПТ с мембраной на основе оксида алюминия незначительно уступает данным транзисторам: $I_{c(Al)} = 1,9$ мА.

Литература

1. Алхасов С.С., Милешко Л.П. Принцип функционирования и основные сферы использования ионоселективных полевых транзисторов // Технологии техносферной безопасности. Вып. 5 (57). 2014. С. 257-262. <http://academygps.ru/ttb>.
2. Милешко Л.П. Анодное электролитическое легирование термических оксидных плёнок кремния // ФХОМ. 2002. № 6. С. 55-59.
3. Милешко Л.П., Авдеев С.П. Реанодирование анодных оксидных плёнок в легирующих электролитах // ФХОМ. 2004. № 4. С. 61-63.
4. Милешко Л.П., Авдеев С.П. Влияние процесса анодного окисления кремния на параметры диффузии примесей бора и фосфора из легированных оксидных плёнок // Известия вузов. Электроника. 2004. № 5. С. 25-32.
5. Берман Л.С. Моделирование вольт амперных характеристик транзистора с сегнето-электрическим изолятором // Физика и техника полупроводников. 2001. Т. 35. Вып. 11. С. 1391-1395.
6. Ассессоров В.В., Быкадорова Г.В., Ткачев А.Ю. Моделирование полевых полупроводниковых приборов в САПР ISE TKAD: учебное пособие. Воронеж, 2007. 27 с.
7. Зятков И.И., Максимов А.И., Мошников В.А. Сенсоры на основе полевых транзисторов: учебное пособие. С-П.: изд-во: СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2002. 55 с.
8. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Пер. с англ. По ред. д-ра физ.-мат. наук Р.А. Сурица. М.: "Мир", 1984. Ч. 1. 456 с.
9. Чирок Л.М. Математическая модель электрохимического датчика растворенного кислорода на основе МДП-транзистора // Вестник Брянского технического университета, 2006. № 1 (9). С. 84-86.

References

1. Alhasov S.S., Mileshko L.P. Princip funkcionirovanija i osnovnye sfery ispol'zovanija ionoselektivnyh polevyh tranzistorov (The operating Principle and main areas of use of ion-selective field-effect transistors) // Tehnologii tehnosfernoj bezopasnosti. Vyp. 5 (57). 2014. Pp. 257-262. <http://academygps.ru/ttb>.
2. Mileshko L.P. Anodnoe jelektroliticheskoe legirovanie termicheskikh oksidnyh pljonok kremnija (Anodic electrolytic alloying thermal oxide films of silicon) // FHOM. 2002. No 6. Pp. 55-59.
3. Mileshko L.P., Avdeev S.P. Reanodirovanie anodnyh oksidnyh pljonok v legirujushhih jelektrolitah (Renderovanie anodic oxide films in the alloy electrolytes) // FHOM. 2004. No 4. Pp. 61-63.
4. Mileshko L.P., Avdeev S.P. Vlijanie processa anodnogo okislenija kremnija na parametry diffuzii primesej bora i fosfora iz legirovannyh oksidnyh pljonok (The influence of the anodic oxidation process of silicon on the parameters of the impurity diffusion of boron and phosphorous from doped oxide films) // Izvestija vuzov. Jelektronika. 2004. No 5. Pp. 25-32.
5. Berman L.S. Modelirovanie vol't ampernyh harakteristik tranzistora s segnetojelektricheskim izoljatorom (Modeling of current-voltage characteristics of the transistor with a ferroelectric insulator) // Fizika i tehnika poluprovodnikov. 2001. T. 35. Vyp. 11. Pp. 1391-1395.
6. Asectorov V.V., Bykadorova G.V., Tkachev A.Ju. Modelirovanie polevyh poluprovodnikovyh priborov v SAPR ISE TKAD: uchebnoe posobie (Modeling the field of semiconductor devices in CAD systems ISE TKAD: a tutorial). Voronezh, 2007. 27 p.
7. Zjat'kov I.I., Maksimov A.I., Moshnikov V.A. Sensory na osnove polevyh tranzistorov: uchebnoe posobie (Sensors based on field-effect transistors: a tutorial). S-P.: izd-vo: SPbGJeTU "LJeTI", 2002. 55 p.
8. Zi S. Fizika poluprovodnikovyh priborov (Physics of semiconductor devices). Per. s angl. Po red. d-ra fiz.-mat. nauk R.A. Surisa. M.: "Mir", 1984. Ch. 1. 456 p.
9. Chirok L.M. Matematicheskaja model' jelektrohimičeskogo datchika rastvorennogo kisloroda na osnove MDP-tranzistora (Mathematical model of an electrochemical dissolved oxygen sensor based on MIS-transistor) // Vestnik Brjanskogo tehničeskogo universiteta, 2006. No 1 (9). Pp. 84-86.