



УДК 544.6.076

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.599.603

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

## STUDYING THE ELECTROCHEMICAL PART OF THE ELECTROCHEMICAL TRANSDUCER TRANSFER FUNCTION

ЖЕВНЕНКО ДМИТРИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ<sup>1,2,3</sup>ZHEVNENKO DMITRY A.<sup>1,2,3</sup>ГОРНЕВ ЕВГЕНИЙ СЕРГЕЕВИЧ<sup>2,3</sup>GORNEV EVGENY S.<sup>2,3</sup>КУЗЬМЕНКО ВАЛЕНТИН ОЛЕГОВИЧ<sup>3</sup>KUZMENKO VALENTIN O.<sup>3</sup>КОХАНОВСКИЙ СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ<sup>1</sup>KOKHANOVSKY SERGEY V.<sup>1</sup>ДУДКИН ПАВЕЛ ВАЛЕНТИНОВИЧ<sup>1,3</sup>DUDKIN PAVEL V.<sup>1,3</sup>ЖАБИН СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ<sup>3</sup>ZHABIN SERGEI N.<sup>3</sup>КРИШТОП ВЛАДИМИР ГРИГОРЬЕВИЧ<sup>1,4</sup>KRISHTOP VLADIMIR G.<sup>1,4</sup><sup>1</sup>ООО «Сейсмотроника»

Россия, г. Москва, Долгопрудненское ш., 3

<sup>2</sup>АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград,

1-й Западный проезд, 12, стр. 1

<sup>3</sup>Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

<sup>4</sup>Институт проблем технологии микроэлектроники  
и обособистых материалов РАН

142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6

<sup>1</sup>Seismotronics LLC

3 Dolgoprudnenskoye Highway, Dolgoprudny, 141700

<sup>2</sup>Molecular Electronics Research Institute JSC

bld. 1, 12 1st Zapadny Lane, Zelenograd,

Moscow, 124460, Russia

<sup>3</sup>Moscow Institute of Physics and Technology  
(State University)

9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia

<sup>4</sup>Institute of Microelectronics Technology and High-Purity  
Materials of RAS

6 Ac. Ossipyay St., Chernogolovka, 142432, Russia,

Исследована электрохимическая часть передаточной функции электрохимического преобразователя, смоделированы процессы преобразования в электрохимическом преобразователе, показаны процессы обработки механического сигнала во времени и рассчитана электрохимическая часть передаточной функции электрохимического преобразователя с сетчатыми электродами. Проведен эксперимент по прямому измерению электрохимической передаточной функции электрохимического преобразователя с сетчатыми электродами и получено хорошее согласие расчетов с экспериментом.

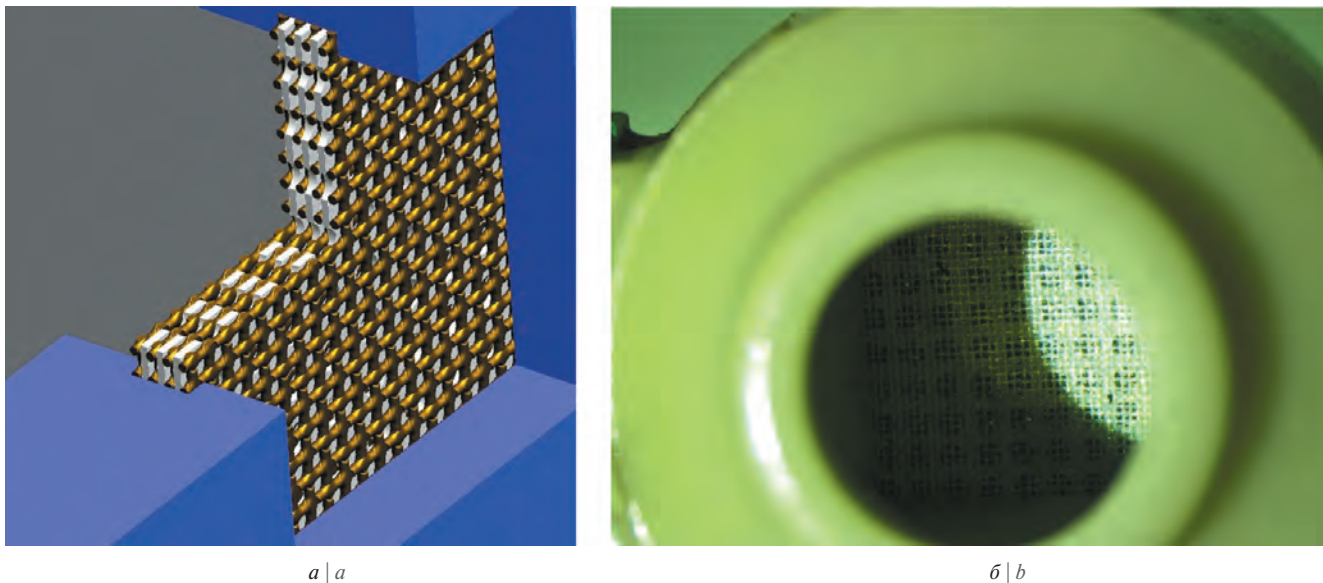
**Ключевые слова:** электрохимический преобразователь; передаточная функция; диффузионный перенос.

The paper deals with studying the electrochemical part of the transfer function of the electrochemical transducer, simulating the transducing processes, processing the mechanical signal in time and calculating the electrochemical part of the transfer function of the electrochemical transducer with grid electrodes. We have set up an experiment for the direct measurement of the electrochemical part of the transfer function of the electrochemical transducer with grid electrodes, and a good agreement between the calculations and experiment has been obtained.

**Keywords:** electrochemical transducer; transfer function; diffusion transfer.

Разработка электрохимических преобразователей параметров движения — одна из наиболее быстро развивающихся областей микросистемной техники [1, 2]. Современное состояние приборостроения на базе электрохимических преобразователей освещено в [3, 4]. Электрохимические системы очень перспективны для построения датчиков движения и датчиков давления. Линейные и вращательные датчики на основе электрохимической регистрации сигнала успешно используются в системах наземной и водной сейсморазведки как регистрирующее устройство в составе распределенных систем сбора данных [5, 6]; электрохимические датчики вращательных движений используются

в системах инерциальной навигации, например в устройстве для определения направления на геометрический север [9, 10]. Развитие микроэлектронных технологий изготовления электрохимических датчиков [11–15] позволит в ближайшем будущем массово использовать их в системах дистанционного управления летательными и подводными аппаратами, в системах управления и стабилизации роботов и в системах инерциальной навигации. Объединение преимуществ электрохимической регистрации сигналов и микроэлектронных технологий потенциально способно привести к созданию нового класса микроэлектронных приборов.



а | а

б | б

Рис. 1. 3D-модель сеточного электрохимического преобразователя (а) и экспериментальный образец (б)  
Fig. 1. 3D model of the mesh electrochemical transducer (a) and the experimental sample (b)

Электрохимический преобразователь представляет собой несколько электродов, размещенных в канале, где электролитическая жидкость протекает вблизи электродов под воздействием внешнего механического сигнала. Передаточная функция электрохимического преобразователя состоит из двух компонент — механической и электрохимической (1):

$$W(\omega) = W_{\text{мех}}(\omega) \cdot W_{\text{эл-хим}}(\omega) = \frac{Q(\omega) I(\omega)}{a(\omega) Q(\omega)}, \quad (1)$$

где  $a(\omega)$  — внешнее механическое ускорение,  $Q(\omega)$  — объемный расход жидкости,  $W_{\text{мех}}(\omega)$  — передаточная функция механической части системы, характеризующая преобразование внешнего ускорения в поток жидкости (электролита),  $W_{\text{эл-хим}}(\omega)$  — передаточная функция электрохимической части системы,

показывающая зависимость выходного сигнала от потока электролита через электроды. При разработке и улучшении ЭХП необходимо отдельно учитывать вклад в итоговые характеристики электрохимической и механической системы.

Мы исследовали электрохимическую часть передаточной функции электрохимического преобразователя с электродами на основе металлической сетки (рис. 1). Мы поставили задачу теоретического расчета электрохимической части передаточной функции электрохимического преобразователя и прямого экспериментального ее измерения.

Мы использовали стандартный математический подход к решению этой задачи [16–18], основанный на совместном решении уравнений Навье — Стокса и конвективной диффузии. В качестве граничного условия для электролитической жидкости

The development of electrochemical transducers of motion parameters is a fast growing area of microsystem technology [1, 2]. Electrochemical systems are very promising for the construction of motion sensors and pressure sensors. The current state of instrument engineering based on electrochemical transducers is reviewed in [3, 4]. Linear and rotary sensors based on electrochemical signal recording are successfully used in ground and water seismic systems as *sensing elements* in distributed data acquisition systems [5, 6], electrochemical rotational sensors are used in inertial navigation systems, for example, in a device for precise azimuth determination [7, 8]. In the near future, the development of microelectronic technologies for manufacturing electrochemical sensors [9–13] will make it possible to use them in the systems of remote control of flying and underwater vehicles, in control and stabilization systems for robots, and in inertial

navigation systems. Combining the advantages of electrochemical signal recording and microelectronic technologies can lead to the creation of a new class of microelectronic devices.

Electrochemical transducer consists of a several electrodes placed in the channel, where the electrolytic liquid flows near the electrodes under the influence of an external mechanical signal. The transfer function of the electrochemical transducer consists of two factors — mechanical and electrochemical (1):

$$W(\omega) = W_{\text{мех}}(\omega) \cdot W_{\text{эл-хим}}(\omega) = \frac{Q(\omega) I(\omega)}{a(\omega) Q(\omega)}, \quad (1)$$

where  $a(\omega)$  is external mechanical acceleration,  $Q(\omega)$  — liquid volumetric flow rate,  $W_{\text{мех}}(\omega)$  — transfer function of the mechanical part of the system that describes converting of external acceleration into the fluid flow (of electrolyte),  $W_{\text{эл-хим}}(\omega)$  — transfer function

of the electrochemical part of the system that describes the dependence of the output signal on the electrolyte flow through the electrodes. For developing and improving ECT, it is necessary to take into account the contribution to the final characteristics of the electrochemical and mechanical system separately.

We have investigated the electrochemical part of the transfer function of an electrochemical transducer with electrodes based on a metal mesh (Fig. 1). We have solved the problem of theoretical calculation of the electrochemical part of the transfer function of the electrochemical transducer and its direct experimental measurement.

We used a standard mathematical approach based on the Navier — Stokes equation and convective diffusion equation [14–16]. We set the periodic flow through the cross-section of the measuring channel as the boundary condition for the electrolytic liquid.



мы задавали периодический поток через сечение измерительного канала, расчеты проводились с учетом вязкости и плотности электролита, граничных условий Батлера — Фолмера на электродах и уравнения непрерывности.

Для прямого измерения передаточной функции мы использовали электрохимический датчик на основе металлической сетки, аналогичный используемому в сейсмометрах СМЕ4011/СМЕ-4211 производства «Р-сенсорс» (Россия) (рис. 1б). Для прямого управления потоком электролитической жидкости через канал преобразователя использовался гидравлический регулятор механического потока жидкости. Таким образом исключалось влияние механической системы и непосредственно измерялась зависимость выходного сигнала датчика от величины потока жидкости, т. е. электрохимическая составляющая передаточной функции (1).

Графики электрохимической компоненты передаточной функции, полученные в результате прямого измерения и компьютерного счета, изображены на рис. 4. Обе кривые имеют одинаковый характер спада, наклон графика изменяется от  $\omega^{-1/2}$  на низких частотах до  $\omega^{-3/2}$  на высоких, характерные частоты изменения наклона совпадают для обоих графиков.

В нашей работе смоделированы процессы преобразования в электрохимическом преобразователе, показаны процессы обработки механического сигнала во времени, рассчитаны значения скоростей жидкости в объеме (рис. 2), получены распределения концентрации всех типов ионов в электролите (распределение для  $I_3^-$  см. на рис. 3), рассчитана электрохимическая часть передаточной функции электрохимического преобразователя

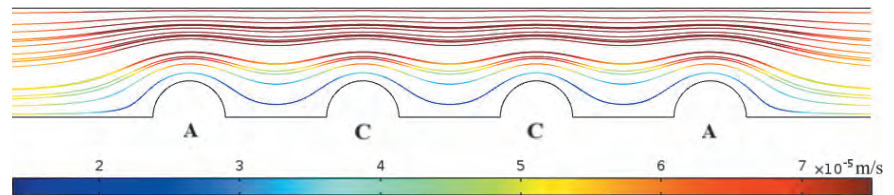


Рис. 2. Модуль скорости жидкости (линии тока жидкости в системе) (А — аноды, С — катоды)

Fig. 2. The fluid velocity module (fluid flow lines in the system) (A — anodes, C — cathodes)

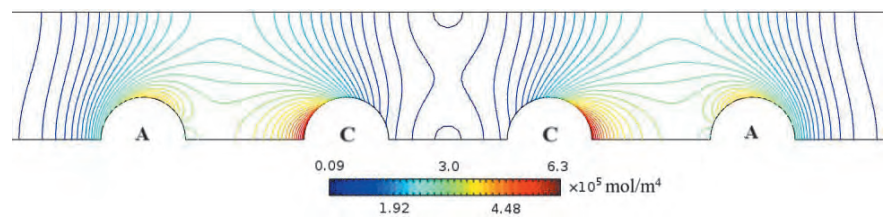


Рис. 3. Градиент концентрации  $I_3^-$  (изолинии модуля градиента концентрации) (А — аноды, С — катоды)

Fig. 3. Concentration gradient  $I_3^-$  (isolines of the concentration gradient module) (A — anodes, C — cathodes)

с сетчатыми электродами с заданными параметрами. Проведен эксперимент по прямому измерению передаточной функции электрохимического преобразователя с сетчатыми электродами и получено хорошее согласие расчетов с экспериментом.

Авторы считают, что в данной работе новым является учет всех компонент ионов в электролите, а также полученные количественные оценки чувствительности и эффективной длины электродов и экспериментальные измерения для чувствительности датчика. Расчет также проводился (в отличие от [14–16]) с точным учетом механизма электромиграции в растворе для всех типов ионов и с учетом экспериментальных данных о вязкости электролита.

The Butler — Volmer boundary conditions were set on the electrodes, the equation of continuity being valid in the volume of electrolyte. Calculations were performed with the viscosity and density of the electrolyte.

For direct measurement of the electrochemical transfer function, we used an electrochemical sensor based on a metal mesh, similar to that used in the СМЕ-4211 seismometer produced by the R-sensor (Russia) (Fig. 1b). A hydraulic regulator of the mechanical flow of liquid was used for the direct control of the flow of electrolytic liquid through the channel. Thus, the influence of the mechanical system was excluded, and the dependence of the sensor output signal on the fluid flow was directly measured. This dependence is the electrochemical factor of the transfer function (1).

The electrochemical factor curves obtained by direct measurement and computer counting are shown in Fig. 4. Both

curves have the same character of recession. The slope of the graphs changes from  $\omega^{-1/2}$  at low frequencies to  $\omega^{-3/2}$  at high frequencies, the characteristic frequencies of change in slope coincide for both graphs.

In our research, we have simulated the processing of a mechanical signal in an electrochemical transducer in time, calculated the values of fluid velocities in the volume (Fig. 2), obtained the distribution of concentration of all types of ions in the electrolyte, (distribution for  $I_3^-$  is shown on Fig. 3), calculated the electrochemical part of the transfer function of the electrochemical transducer with mesh electrodes.

We set up an experiment for the direct measurement of the electrochemical part of the transfer function of the electrochemical transducer with grid electrodes, and a good agreement between the calculations and experiment was obtained.

The main achievements of our research are the account of all types of ions in the electrolyte, and the quantitative estimates of the sensitivity and effective length of the electrodes, as well as experimental measurements of the sensor electrochemical sensitivity. Besides, the calculation was carried out (in contrast to [14–16]) with due account of the electromigration mechanism in solution for all types of ions, and taking into account the experimental data on the viscosity of the electrolyte.

The development of computer models of electrochemical systems allows optimizing the parameters of the system which is very important for the design and improvement of real devices. The methods used in this work and the results obtained can be used in the design and development of sensors and instruments based on electrochemical signal recording.

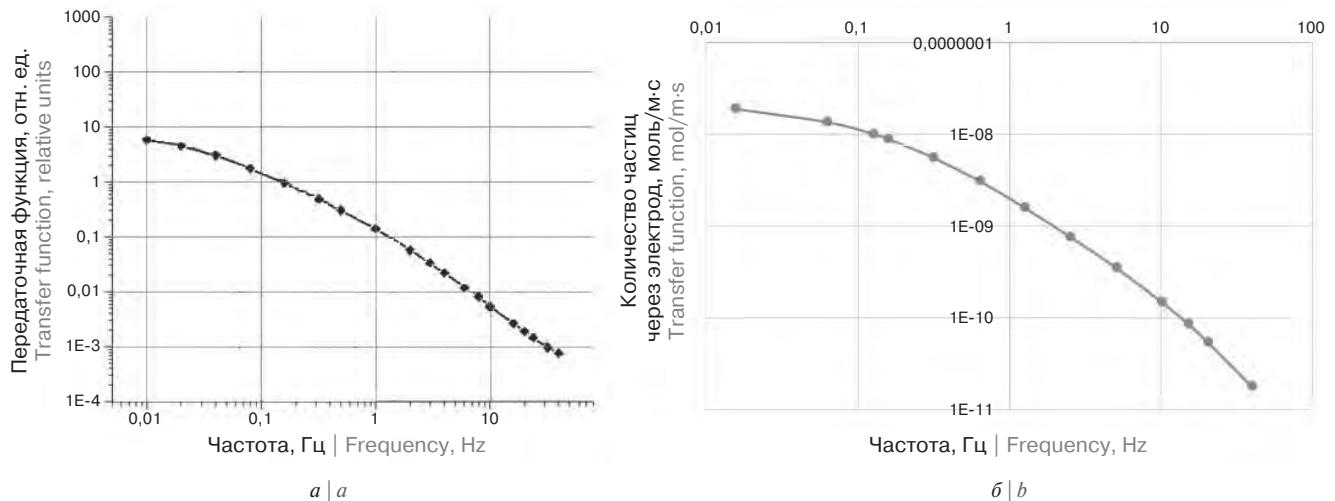


Рис. 4. Сравнение рассчитанной передаточной функции (а) и передаточной функции, измеренной экспериментально (б)  
 Fig. 4. Comparison of the calculated transfer function (a), and the transfer function measured experimentally (b)

Построение рабочих моделей электрохимических систем, позволяющих оптимизировать параметры системы, имеет большое значение для проектирования и производства реальных приборов. Методы, использованные в данной работе, и полученные результаты могут применяться при проектировании и разработке датчиков и приборов на основе электрохимической регистрации сигнала.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 18-07-01162 А.*

#### ЛИТЕРАТУРА.

- Агафонов В. М., Криштоп В. Г., Сафонов М. В. Измерительные устройства на основе молекулярно-электронного переноса в микро- и наноструктурах // Нано- и микросистемная техника, 2010. — № 6. — С. 47–53.
- Агафонов В. М., Криштоп В. Г. Исследование АЧХ молекулярно-электронного преобразователя с новой геометрией // Микросистемная техника, 2004. — № 9. — С. 40–45.
- Шабалина А. С. и др. Молекулярно-электронные преобразователи в современных измерительных приборах // Успехи современной радиоэлектроники, 2014. — № 9. — С. 33–42.
- Бугаев А. С. и др. Измерительные приборы на основе молекулярно-электронных преобразователей // Радиотехника и электроника, 2018. — Т. 63. — № 11.
- Агафонов В. М., Криштоп В. Г., Егоров И. В. Сейсмические датчики на принципах молекулярно-электронного переноса в твердотельных и жидкостных микроструктурах // Приборы и системы разведочной геофизики, 2013. — Т. 43. — № 1. — С. 39–49.
- Бугаев А. С., Агафонов В. М., Криштоп В. Г., Антонов А. Н., Веретин В. С. Сейсмические датчики для использования в нефтяном и газовом комплексе, основанные на молекулярно-электронном переносе в твердотельных и жидкостных микросистемах // Нефтегазопромысловый инжиниринг, 2013, «Спецвыпуск № 3: итоги 2012». — С. 46–52.
- Zaitsev D., Antonov A. and V. Krishtop. *Angular MET sensor for precise azimuth determination* // Proc. SPIE 10224, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016, 102241H.
- Zaitsev Dmitry L., Agafonov Vadim M., Egorov Egor V., Antonov Alexander N. and Krishtop Vladimir G. *Precession Azimuth Sensing with Low-Noise Molecular Electronics Angular Sensors* // Journal of Sensors. Vol. 2016. Article ID 614801.9.
- Криштоп В. Г., Агафонов В. М., Бугаев А. С. Технологические основы преобразователей параметров движения на принципах переноса массы и заряда в электрохимических микросистемах // Электрохимия, 2012. — Т. 48. — № 7. — С. 820–829.
- Жевненко Д. А., Вергелес С. С., Криштоп Т. В., Терешонок Д. В., Горнев Е. С., Криштоп В. Г. Моделирование процессов переноса массы и заряда в планарных электрохимических преобразователях // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2016. — № 4 (164). — С. 31–37.
- Shabalina A. S. and Krishtop V. G. *The precision seismometer based on planar electrochemical transducer* // Proc. SPIE 10224, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016, 102241K.
- Novikov A. V., Egorchikov A. E., Dolgov A. N., Gornev E. S., Popov V. G., Egorov I. V., Krishtop V. G. *The planar silicon-based microelectronic technology for electrochemical transducers* // Proc. SPIE 10224, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016, 102241J.
- Zhevnenko D. A., Vergeles S. S., Krishtop T. V., Tereshonok D. V., Gornev E. S., Krishtop V. G. *The simulation model of planar electrochemical transducer* // Proc. SPIE 10224, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016, 102241I.
- Агафонов В. М., Криштоп В. Г. Частотная характеристика диффузионного датчика механических сигналов на высоких частотах // Электрохимия, 2004. — Т. 40. — № 5. — С. 606–611.
- Захаров И. С. Теория диффузионного преобразователя скорости гидродинамического потока в электрический ток // Электрохимия, 2004. — Т. 40. — № 6. — С. 714–722.
- Козлов В. А., Терентьев Д. А. Коррекция частотной характеристики молекулярно-электронного акселерометра вращательных движений в области инфранизких частот // Микросистемная техника, 2004. — № 10. — С. 41–43.

This work is supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant 18-07-01162 A).

## REFERENCES

1. Agafonov V. M., Krishtop V. G., Safonov M. V. *Izmeritel'nye ustroystva na osnove molekulyarno-elektronnoy perenosa v mikro- i nanostrukturakh* // Nano- i mikrosistemnaya tekhnika, V, 2010. № 6. P. 47–53. (In Russian).
2. Agafonov V. M., Krishtop V. G. *Issledovanie AChKh molekulyarno-elektronnoy preobrazovatelya s novoi geometrii* // Mikrosistemnaya tekhnika, 2004. № 9. P. 40–45. (In Russian).
3. Shabalina A. S. i dr. *Molekulyarno-elektronnye preobrazovatelnye radioelektroniki*, 2014. № 9. P. 33–42. (In Russian).
4. Bugaev A. S. i dr. *Izmeritel'nye pribory na osnove molekulyarno-elektronnykh preobrazovatelykh* // Radiotekhnika i elektronika, 2018. V. 63. № 11. (In Russian).
5. Agafonov V. M., Krishtop V. G., Egorov I. V. *Seismicheskie datchiki na printsipakh molekulyarno-elektronnoy perenosa v tverdotel'nykh i zhidkostnykh mikrostrukturakh* // Pribory i sistemy razvedochnoi geofiziki, 2013. V. 43. № 1. P. 39–49. (In Russian).
6. Bugaev A. S., Agafonov V. M., Krishtop V. G., Antonov A. N., Veretin V. S. *Seismicheskie datchiki dlya ispol'zovaniya v neftyanom i gazovom komplekse, osnovannye na molekulyarno-elektronnom perenose v tverdotel'nykh i zhidkostnykh mikrosistemakh* // Neftegazopromysloviy inzhiniring, 2013, «Spetsvyпуск № 3: itogi 2012». P. 46–52. (In Russian).
7. Zaitsev D., Antonov A. and V. Krishtop. *Angular MET sensor for precise azimuth determination* // Proc. SPIE 10224, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016, 102241H.
8. Zaitsev Dmitry L., Agafonov Vadim M., Egorov Egor V., Antonov Alexander N. and Krishtop Vladimir G. *Precession Azimuth Sensing with Low-Noise Molecular Electronics Angular Sensors* // Journal of Sensors. Vol. 2016. Article ID 614801.9.
9. Krishtop V. G., Agafonov V. M., Bugaev A. S. *Tekhnologicheskie osnovy preobrazovatelykh parametrov dvizheniya na printsipakh perenosa massy i zaryada v elektrokhimicheskikh mikrosistemakh* // Elektrokhiimiya, 2012. V. 48. № 7. P. 820–829. (In Russian).
10. Zhevnenko D. A., Vergeles S. S., Krishtop T. V., Tereshonok D. V., Gornev E. S., Krishtop V. G. *Modelirovanie protsessov perenosa massy i zaryada v planarnykh elektrokhimicheskikh preobrazovatelyakh* // Elektronnyaya tekhnika. Seriya 3: Mikroelektronika, 2016. № 4 (164). P. 31–37. (In Russian).
11. Shabalina A. S. and Krishtop V. G. *The precision seismometer based on planar electrochemical transducer* // Proc. SPIE 10224, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016, 102241K.
12. Novikov A. V., Egorchikov A. E., Dolgov A. N., Gornev E. S., Popov V. G., Egorov I. V., Krishtop V. G. *The planar silicon-based microelectronic technology for electrochemical transducers* // Proc. SPIE 10224, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016, 102241J.
13. Zhevnenko D. A., Vergeles S. S., Krishtop T. V., Tereshonok D. V., Gornev E. S., Krishtop V. G. *The simulation model of planar electrochemical transducer* // Proc. SPIE 10224, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016, 102241I.
14. Agafonov V. M., Krishtop V. G. *Chastotnaya kharakteristika difuzionnogo datchika mekhanicheskikh signalov na vysokikh chastotakh* // Elektrokhiimiya, 2004. V. 40. № 5. P. 606–611. (In Russian).
15. Zakharov I. S. *Teoriya difuzionnogo preobrazovatelya skorosti gidrodinamicheskogo potoka v elektricheskii tok* // Elektrokhiimiya, 2004. V. 40. № 6. P. 714–722. (In Russian).
16. Kozlov V. A., Terent'ev D. A. *Korreksiya chastotnoi kharakteristiki molekulyarno-elektronnoy akselerometra vrashchatel'nykh dvizhenii v oblasti infranizkikh chastot* // Mikrosistemnaya tekhnika, 2004. № 10. P. 41–43. (In Russian).

## КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



Цена 475 руб.

## СВЧ ТРАНЗИСТОРЫ НА ШИРОКОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ

### УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

А. Г. Васильев, Ю. В. Колковский, Ю. А. Концевой

Книга представляет собой учебное пособие по физическим основам и технологии транзисторов на широкозонных полупроводниках. Рассмотрены свойства двумерного электронного газа и физика гетеропереходов, в основном типа AlGaIn/GaN. Дан обзор структур транзисторов на основе широкозонного полупроводника GaN. Рассмотрены структуры транзисторов на алмазе и карбиде кремния. Описаны свойства подложек из сапфира, карбида кремния и других материалов, применяющихся для создания гетероструктур.

Детально проанализированы методы изготовления гетеропереходов при использовании эпитаксии из металлоорганических соединений и молекулярно-лучевой эпитаксии. Рассмотрена технология транзисторов на алмазе, методы измерения основных параметров СВЧ транзисторов и методы контроля надежности транзисторов.

Книга предназначена для студентов, обучающихся по профилю 210100 «Электроника и нанoeлектроника». Книга будет полезна также магистрам, аспирантам, инженерам и научным работникам, специализирующимся в области разработки и применения изделий твердотельной электроники.

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2011. – 256 с.  
ISBN 978-5-94836-290-8

## КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 (495) 234-0110; 📠 +7 (495) 956-3346; ✉ knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru