

#### Рисунки к статье И. А. Глинского «ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАЗМОННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РЕШЕТОК ДЛЯ ФОТОПРОВОДЯЩИХ АНТЕНН»

I. A. Glinskiy

### «ELECTROMAGNETIC MODELING OF PLASMONIC METAL GRATINGS FOR THE PHOTOCONDUCTIVE ANTENNAS»



Рис. 1. Схематичное изображение ФПА с плазмонной решеткой

Fig. 1. Schematical image of PCA with a plasmonic grating





Рис. 2. Распределение электрического поля в плазмонной ФПА при высоте электродов 100 нм и периодом решетки 200 нм (*a*) и в традиционной ФПА (*b*) при накачке 800 нм

Fig. 2. Electric distribution of the field in a plasmonic PCA at the height of the electrodes of 100 nm and the period of grating of 200 nm (a) and in a traditional PCA (b) at the pumping of 800 nm

# <u>ТАНО- и МИКРОСИСІЕННАЯ</u> ТЕХНИА Том 20. № 11 \$ 2018

#### ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Журнал включен в международные базы данных на платформе Web of Science: Chemical Abstracts Service (CAS), которая входит в Medline, и Russian Science Citation Index (RSCI).

Журнал индексируется в системе Российского индекса научного цитирования (РИН́Ц) и включен в международную базу INSPEC. Журнал включен в Перечень международных реферируемых баз данных по научному направлению 02.00.00 химические науки и в Перечень научных и научно-технических изданий ВАК России по научным направлениям: 01.04.00 физика, 05.27.00 электроника. Журнал выпускается при научно-методическом руководстве Отделения нанотехнологий и информационных технологий Российской академии наук Статьи имеют DOI и печатаются в журнале на русском и английском языках

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

Издается с 1999 г.

#### Главный редактор

Мальцев П. П., д.т.н., проф.

#### Зам. гл. редактора

Лучинин В. В., д.т.н., проф. Шур М., д.ф.-м.н., проф. (США)

#### Редакционный совет:

Асеев А. Л., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН Грибов Б. Г., д.х.н., чл.-кор. РАН Ковальчук М. В., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН Кульчин Ю. Н., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН Лабунов В. А., д.т.н., проф., акад. НАНБ (Беларусь) Рыжий В. И., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН Сауров А. Н., д.т.н., проф., акад. РАН Сигов А. С., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН Чаплыгин Ю. А., д.т.н., проф., акад. РАН Шевченко В. Я., д.х.н., проф., акад. РАН

#### Редакционная коллегия:

Абрамов И. И., д.ф.-м.н., проф. (Беларусь) Андреев А., к.ф.-м.н. (Великобритания) Астахов М. В., д.х.н., проф. Бакланов М. Р., д.х.н., проф. (Китай) Басаев А. С., к.ф.-м.н. Викулин В. В., к.х.н., д.т.н., проф. Горнев Е. С., д.т.н., проф. Кальнов В. А., к.т.н. Карякин А. А., д.х.н., проф. Кузнецов В. И., д.т.н. (Нидерланды) Леонович Г. И., д.т.н., проф. Панин Г. Н., к.ф.-м.н., проф. (Южная Корея) Панич А. Е., д.т.н., проф. Пожела К., д.ф.-м.н. (Литва) Рыжий М. В., д.т.н., проф. (Япония) Сантос Э. Х. П., PhD, Ful. Prof. (Бразилия) Сингх К., к.т.н. (Индия) Телец В. А., д.т.н., проф. Тимошенков С. П., д.т.н. Хабибуллин Р. А., к.ф.-м.н. Шашкин В. И., д.ф.-м.н., проф. Шубарев В. А., д.т.н., проф.

#### Редакция:

Антонов Б. И. (директор изд-ва) Лысенко А. В. (отв. секретарь) Чугунова А. В. Фокин В. А., к.х.н. (ред. перевода) Щетинкин Д. А. (сайт)

### СОДЕРЖАНИЕ

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В. А., Романова И. А., Щербакова И. Ю. Моделирование передаточных характеристик двух- затворных полевых графеновых транзисторов	643
<b>Глинский И. А.</b> Электромагнитное моделирование плазмонных металлических решеток для фотопроводящих антенн	651
МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ	
Васильев В. Ю. Технологии получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Часть 5. Плазмоактивированные процессы в реакторах циклического действия	659
элементы мнст	
<b>Денисюк С. В., Мухуров Н. И., Куданович О. Н.</b> Двухзонные газовые сенсоры на подложках Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> с тонкопленочными чувствительными элементами из оксида железа	676
Эннс Я. Б., Пятышев Е. Н., Акульшин Ю. Д., Эннс П. Б. Бистабиль- ное микромеханическое реде на основе потери устойчивости нели-	

Шубин В. В. Быстродействующий КМОП-преобразователь уровня напряжения ..... 695

Аннотации и статьи на русском и английском языках доступны на сайте журнала (http://microsystems.ru; http://novtex.ru/nmst/) в разделе "Архив статей с 1999 г.".

#### ПОДПИСКА:

по каталогу "Пресса России" (индекс 27849)

Адрес для переписки: 107076 Москва, Стромынский пер., д. 4 e-mail: nmst@novtex.ru

в редакции журнала (тел./факс: (499) 269-55-10) е-1 Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

© Издательство "Новые технологии", "Нано- и микросистемная техника", 2018

INTERDISCIPLINARY, SCIENTIFIC, TECHNIQUE AND PRODUCTION JOURNAL

# NANO- and MICROSYSTEMS TECHNOLOGY

### (Title "NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEKHNIKA")

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

#### **CHIEF EDITOR**

Maltsev P. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

#### **DEPUTY CHIEF EDITOR**

Luchinin V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

#### **DEPUTY CHIEF EDITOR**

Shur M. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. (USA)

#### **Editorial council:**

Aseev A. L., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS Chaplygin Ju. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. RAS Gribov B. G., Dr. Sci. (Chem.), Cor.-Mem. RAS Kovalchuk M. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS Kuljchin Yu. N., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS Labunov V. A. (Belorussia), Sci. (Tech.), Acad. NASB Ryzhii V. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS Saurov A. N., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. RAS Shevchenko V. Ya., Dr. Sci. (Chem.), Prof., Acad. RAS Sigov A. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS

#### **Editorial board:**

Abramov I. I. (Belorussia), Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. Andreev A. (UK), Cand. Sci. (Phys.-Math.), Prof. Astahov M. V., Dr. Sci. (Chem.), Prof. Baklanov M. R., Dr. Sci. (Chem.), Prof. (China) Basaev A. S., Cand. Sci. (Phys.-Math.) Gornev E. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Kalnov V. A., Cand. Sci. (Tech.) Karjakin A. A., Dr. Sci. (Chem.), Prof. Khabibullin R. A., Cand. Sci. (Phys.-Math.) Kuznetsov V. I., Dr. Sci. (Tech.) (Netherlands) Leonovich G. I., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Panich A. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Panin G. N., PhD, Prof. (South Korea) Pozhela K. (Lithuania), Dr. Sci. (Phys.-Math.) Ryzhii M. V., (Japan), Dr. Eng., Prof. Santos E. J. P., PhD, Prof. (Brasil) Shubarev V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Shashkin V. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. Singh K., PhD (India) Telets V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof. Timoshenkov S. P., Dr. Sci. (Tech.) Vikulin V. V., Cand. Chem. Sci., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

#### **Editorial staff:**

Antonov B. I. (Director Publ.) Lysenko A. V. (Executive secretary) Chugunova A. V. Fokin V. A., Cand. Sci. (Chem.) Shchetinkin D. A. (site) of the chemical sciences — Chemical Abstracts Service (CAS) and of the engineering sciences — INSPEC, and it is also indexed in the Russian Science Citation Index (RSCI) based on the Web of Science platform. The Journal is included in the Russian System of Science Citation Index and the List of Journals of the Higher Attestation Commission of Russia. Its articles have DOI and are printed in the Journal in Russian and English languages. The Journal is published under the scientific-methodical guidance of the Branch of Nanotechnologies and Information Technologies of the Russian Academy of Sciences.

Vol. 20

No. 11

### CONTENTS

#### MODELLING AND DESIGNING OF MNST

The Journal is included in the international databases

**Glinskiy I. A.** Electromagnetic Modeling of Plasmonic Metal Gratings for the Photoconductive Antennas

### SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

#### MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

Shubin V. V. High-Speed CMOS Voltage Level Converter . . . . . 700

Our:

Web: www.microsistems.ru/eng; e-mail: nmst@novtex.ru

# Моделирование и конструирование MHCT Modelling and designing of MNST

УДК 621.382

DOI: 10.17587/nmst.20.643-650

**И. И. Абрамов,** д-р физ.-мат. наук, проф., **Н. В. Коломейцева,** науч. сотр., **В. А. Лабунов,** д-р техн. наук, акад. НАНБ, акад. РАН, проф., зав. лаб., **И. А. Романова,** науч. сотр., **И. Ю. Щербакова,** мл. науч. сотр., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, 220013, Республика Беларусь,

E-mail: nanodev@bsuir.edu.by

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХЗАТВОРНЫХ ПОЛЕВЫХ ГРАФЕНОВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Поступила в редакцию 30.05.2018

Разработана упрощенная комбинированная самосогласованная модель полевых графеновых транзисторов (ПГТ), предназначенная для расчета их передаточных характеристик. В качестве примера были рассчитаны характеристики двухзатворного ПГТ при различных напряжениях на стоке. Получено хорошее согласование результатов расчетов, проведенных с использованием предложенной модели, с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** полевой транзистор, однослойный графен, передаточная вольт-амперная характеристика, комбинированная модель, моделирование

#### Введение

Перспективным направлением в высокочастотной наноэлектронике являются разработка и создание приборных структур на основе углеродных наноматериалов [1]. В последнее время проводятся интенсивные исследования по созданию моделей таких приборных структур, без которых их разработка и оптимизация, а следовательно, и широкое внедрение в практику будут невозможны. К сожалению, разработка моделей является достаточно трудоемким и длительным процессом, особенно в случае построения и реализации высокоадекватных численных моделей [2]. В то же время простые (компактные) модели, к сожалению, не характеризуются требуемой универсальностью. Так, разработанные нами ранее высокоэкономичные упрощенные модели полевых графеновых транзисторов (ПГТ) [3-7] целесообразно использовать для расчета их выходных характеристик. Более сложным является моделирование передаточных характеристик ПГТ.

В данной статье приведено описание разработанной модели двухзатворных полевых транзисторов на основе однослойного графена. Эта модель может быть использована для расчета передаточной вольт-амперной характеристики (BAX) таких транзисторов и иллюстрации ее возможностей.

#### Модель

Предложенная модель, так же как и модели, представленные в работах [3—7], разработана на основе квантовой диффузионно-дрейфовой модели [8, 9]. Согласно классификации работ [9—11] она может быть отнесена к классу комбинированных моделей, так как является комбинацией физико-топологической и электрической моделей.

Рассмотрим эту модель.

На первом этапе в модели вычисляется квантовая емкость по упрощенной формуле [12]

$$C_q = \frac{2q^3}{\pi(\eta V_F)^2},\tag{1}$$

где q — заряд электрона;  $\eta$  — постоянная Планка, деленная на  $2\pi$ ;  $V_F = 10^6$  м/с — скорость Ферми.

После этого рассчитываются емкости затворов по формуле

$$C_g = \frac{C_q C_{in}}{C_q + C_{in}},\tag{2}$$

где  $C_{in}$  — емкость, сформированная между затвором и слоем графена.

Далее, как и в моделях, описанных в работах [6, 7], самосогласованно рассчитывается электро-

статический потенциал V с применением итерационного метода. При этом использованы следующие формулы работ [12, 13]:

$$V = \frac{C_{gt}(V_{tg} - V_{tg0} - V_a) + C_{gb}(V_{beff} - V_a)}{C_{gt} + C_{gb} + \alpha C_q}; \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{1 + \frac{q^2 V^2}{\left(k T \ln(4)\right)^2}} + 1 \right);$$
(4)

$$C_{q} = \frac{2q^{3}}{\pi(\eta V_{F})^{2}}|V|,$$
 (5)

где  $C_{gt}$ ,  $C_{gb}$  — емкости верхнего, нижнего затворов;  $\alpha$  — коэффициент емкости ( $\alpha$  = 0,5 при  $q|V| \gg kT$ );  $V_{tg}$  — напряжение на верхнем затворе;  $V_{beff}$  — эффективное напряжение на нижнем затворе;  $V_{tg0}$  напряжение Дирака для верхнего затвора; V электростатический потенциал канала;  $V_a$  изменяется в диапазоне от 0 до  $V_{ch}$ ;  $V_{ch}$  — полное падение напряжения в канале; k — постоянная Больцмана; T — температура окружающей среды.

Перерасчет величин осуществляется самосогласованно до тех пор, пока поправка электростатического потенциала в канале не достигнет заданного значения.

На втором этапе на основе найденного электростатического потенциала в канале рассчитывается эффективная подвижность носителей заряда в графене µ, учитывающая подвижности электронов и дырок [13]:

$$\mu = \left( \frac{14(\mu_p - \mu_n) \left( \frac{\pi (kT)^2}{3(\eta V_F)^2} + \frac{q^2}{\pi (\eta V_F)^2} V^2 \right) V}{\left( \left( \frac{\pi (kT)^2}{3(\eta V_F)^2} + \frac{q^2 V^2 + \Delta^2}{\pi (\eta V_F)^2} \right) \sqrt{1 + \frac{q^2}{(kT\ln(4))^2} V^2} + h \right)} \times \frac{m}{m + V^2}, \quad (6)$$

где  $\mu_p$  и  $\mu_n$  — подвижности электронов и дырок соответственно;  $\Delta$  — неоднородность электростатического потенциала; h и m — согласующие параметры модели.

Общая плотность заряда листа графена *Q* определяется согласно [14]:

$$Q = \frac{q\pi(kT)^2}{3(\eta V_F)^2} + \frac{q^3 V^2 + q\Delta^2}{\pi(\eta V_F)^2}.$$
 (7)

Для нахождения тока стока используется формула, полученная из квантовой диффузионнодрейфовой модели [3—7]:

$$I_{d} = \frac{W \int_{0}^{V_{ch}} \mu Q dV}{L + \left| \int_{0}^{V_{ch}} \frac{\mu}{V_{sat}} dV \right|},$$
(8)

где W — ширина канала; L — длина канала;  $V_{sat}$  — скорость насыщения.

Скорость насыщения рассчитывается с учетом рассеяния на оптических фононах на основе модели работы [15]:

$$V_{sat} = \begin{cases} \frac{2 V_F}{\pi}, \text{ если } |Q_{net}| \le q |\rho_{crit}| \\ \frac{2 q \Omega}{\pi^2 \eta V_F |Q_{net}|} \sqrt{\frac{\pi (\eta V_F)^2 |Q_{net}|}{q} - (\frac{\eta \Omega}{2})^2}, & (9) \\ \text{если } |Q_{net}| > q |\rho_{crit}|, \end{cases}$$

$$\rho_{crit} = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{\Omega}{V_F} \right), \tag{10}$$

где  $\rho_{crit}$  — критическая плотность носителей заряда;  $Q_{net}$  — плотность заряда носителей в канале ( $Q_{net} = |\alpha C_q V|$ );  $\eta \Omega$  — эффективная энергия оптических фононов.

Заметим, что, если не учитывать квантовые явления и падения напряжений на областях стока и истока, то в этом случае  $V_{ch} = V_d (V_d -$ напряжение, прикладываемое к стоку относительно истока), а соотношение (8) приводит к традиционной диффузионно-дрейфовой модели, используемой многими авторами (иногда с модификациями и коррекциями) при расчете тока стока ПГТ.

Сложность расчета передаточных ВАХ ПГТ заключается в необходимости рассчитывать ток стока  $I_d$  при фиксированном напряжении стока  $V_d$ . Проблем не возникает только в случае, когда не учитываются сопротивления областей стока  $R_d$  и истока  $R_s$ , т. е.  $R_d = R_s = 0$  [3, 6]. В противном, реальном случае ( $\vec{R}_d$  и  $\vec{R}_s$  не равны 0) для учета падений напряжений на этих сопротивлениях необходимо осуществлять перерасчет тока стока  $I_d$ , чтобы получить фиксированное напряжение на стоке  $V_d$ , т. е. применять оптимизационный метод. Нами был использован относительно простой метод дихотомии, который удовлетворительно зарекомендовал себя в гораздо более сложных задачах многомерного численного моделирования фрагментов кремниевых СБИС [16, 17].



Рис. 1. Блок-схема алгоритма реализации метода дихотомии для расчета передаточных ВАХ ПГТ

Fig. 1. Block diagram of the algorithm for realization of the method of dichotomy for calculation of the transfer IV-characteristics of GFET

Блок-схема алгоритма расчета приведена на рис. 1. Деление отрезка [a, b] продолжается, пока его длина не станет меньше заданного значения *eps*  $(K_1 - также эмпирический параметр). То есть при$ изменении напряжения на затворе получаем такой $ток стока <math>I_d$ , при котором напряжение  $V_{dnew}$  будет сохраняться приблизительно постоянным при учете сопротивлений стока и истока. В алгоритме ток стока перерассчитывается в рассмотренной выше последовательности, с учетом новых пределов интегрирования. На завершающем этапе после нахождения  $I_d$  перерассчитывается напряжение на верхнем затворе с учетом падения напряжения на сопротивлении истока  $R_m$  т. е.  $V_{tors} = V_{ta} + R_s I_d$ .

сопротивлении истока  $R_s$ , т. е.  $V_{tgs} = V_{tg} + R_s I_d$ . Предложенная модель позволяет получить хорошее согласование с экспериментальными данными, так как электростатический потенциал в канале и квантовая емкость рассчитываются самосогласованию. Как правило, параметрами модели при согласовании расчетов с экспериментом являются сопротивления на стоке  $R_d$  и истоке  $R_s$ , а также h и m в эффективной подвижности носителей заряда (6).

Программы, реализующие предложенную модель, включены в систему моделирования наноэлектронных устройств NANODEV [18—20], разрабатываемую в БГУИР с 1995 г. и предназначенную для ПЭВМ.

#### Результаты моделирования

С применением предложенной комбинированной модели получены передаточные характеристики двухзатворного ПГТ на однослойном графене. Расчеты выполняли для комнатной температуры. На графиках приведены результаты для плотности тока стока для удобства сравнения с экспериментальными данными.

На рис. 2 показано поперечное сечение исследуемого двухзатворного ПГТ на основе однослойного графена на подложке SiO<sub>2</sub>/Si. Нижний затвор двухзатворного ПГТ отделен от канала диэлектриком SiO<sub>2</sub> толщиной 300 нм. Слой Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> толщиной 15 нм является диэлектриком верхнего затвора. Длина канала L = 5 мкм, а другие параметры ПГТ приведены в работе [21]. Характеристики рассчитаны с учетом не только электронной, но и дырочной проводимости.

На рис. 3 иллюстрируется сравнение результатов моделирования, полученных с использованием предложенной модели, с экспериментальными данными работы [21] при различных напряжениях на стоке. Кривая *1* соответствует  $V_d = 1,1$  В, кривая  $2 - V_d = 0,85$  В, кривая  $3 - V_d = 0,6$  В,  $4 - V_d = 0,35$  В. Отметим хорошее согласование результатов моделирования с использованием параметров h = 0,1 м<sup>2</sup>/(B·c), m = 0,063 В<sup>2</sup>,  $R_d = R_s = 30$  Ом с экспериментальными данными работы [21].

На рис. 4 показаны передаточные характеристики ПГТ при различных сопротивлениях стока  $R_d$ и истока  $R_c$ . Расчеты проведены при напряжении



Рис. 2. Поперечное сечение двухзатворного ПГТ на основе однослойного графена: S — исток; G — верхний затвор; BG — нижний затвор; D — сток; 1 — подложка; 2 — диэлектрик нижнего затвора; 3 — диэлектрик верхнего затвора; 4 — металл верхнего затвора; 5 — металл нижнего затвора; 6 — металл истока и стока; 7 — графен

Fig. 2. Cross-section of a dual-gate GFET on the basis of a single-layer graphene: S — source; G — top gate; BG — back gate; D — drain; 1 — substrate; 2 — back-gate dielectric; 3 — top-gate dielectric; 4 — top-gate metal; 5 — metal of the bottom gate; 6 — source and drain metal; 7 — graphene



Рис. 3. Передаточные характеристики двухзатворного ПІГТ при различных напряжениях на стоке:  $1 - V_d = 1,1$  В;  $2 - V_d = 0,85$  В;  $3 - V_d = 0,6$  В;  $4 - V_d = 0,35$  В; 5 -экспериментальные данные, соответствующие различным напряжениям на стоке  $V_d$  [21] Fig. 3. Transfer characteristics of a dual-gate GFET at various drain voltages  $1 - V_d = 1,1$  V;  $2 - V_d = 0,85$  V;  $3 - V_d = 0,6$  V;  $4 - V_d = 0,35$  V; 5 -experimental data corresponding to various drain voltages  $V_d$  [21]



Рис. 4. Передаточные характеристики двухзатворного ПГТ с длиной канала 5 мкм при различных сопротивлениях стока и истока:  $I - R_d = R_s = 0$  Ом;  $2 - R_d = R_s = 10$  Ом;  $3 - R_d = R_s = 20$  Ом;  $4 - R_d = R_s = 30$  Ом

Fig. 4. Transfer characteristics of the dual-gate GFET with the length of the channel of 5  $\mu$ m at various drain and source resistances: 1 –  $R_d = R_s = 0 \ \Omega$ ; 2 –  $R_d = R_s = 10 \ \Omega$ ; 3 –  $R_d = R_s = 20 \ \Omega$ ; 4 –  $R_d = R_s = 30 \ \Omega$ 

на стоке  $V_d = 0,6$  В. Отметим, что с увеличением сопротивления ток стока падает. Результаты иллюстрируют важность учета сопротивлений стока  $R_d$  и истока  $R_s$  при моделировании передаточных ВАХ ПГТ.

#### Заключение

С использованием разработанной комбинированной модели двухзатворных полевых графеновых транзисторов исследованы передаточные характеристики приборных структур при различных напряжениях на стоке. Модель построена на основе уравнений квантовой диффузионно-дрейфовой модели и позволяет рассчитывать характеристики транзисторов на однослойном графене с различными подзатворными диэлектриками. Благодаря совместному учету в модели ряда важных факторов, а именно: 1) подвижностей электронов и дырок; 2) квантовой емкости; 3) сопротивлений стока и истока и возможного их различия, получено удовлетворительное согласование с экспериментальными данными для ряда передаточных характеристик ПГТ. Показана необходимость использования самосогласованного расчета для нахождения электростатического потенциала в исследуемом приборе. Для учета сопротивлений стока и истока при моделировании передаточных характеристик применен метод дихотомии. Проиллюстрировано важное влияние сопротивлений стока и истока на передаточные вольт-амперные характеристики ПГТ. Программа, реализующая модель, включена в систему моделирования наноэлектронных устройств NANODEV.

Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований "Конвергенция" Республики Беларусь.

#### Список литературы

1. Быстров Р. П., Гуляев Ю. В., Никитов С. А., Соколов А. В. Микро- и наноэлектроника применительно к системам радиолокации и радиосвязи // Успехи современной радиоэлектроники. 2010. № 9. С. 11—50.

2. Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В. А., Романова И. А. Моделирование резонансно-туннельных приборных структур на основе углеродных наноматериалов // Нанотехнологии, разработка, применение: XXI век. 2017. Т. 9, № 3. С. 3—11.

3. Abramov I. I., Labunov V. A., Kolomejtseva N. V., Romanova I. A. Simulation of field-effect transistors and resonant tunneling diodes based on graphene // Proc. SPIE. 2016. Vol. 10224. P. 102240V-1—10.

4. Абрамов И. И., Лабунов В. А., Коломейцева Н. В., Романова И. А. Моделирование приборных структур на основе графена // Сборник научных трудов VII Международной научной конференции "Материалы и структуры современной электроники", Минск, БГУ, 2016. С. 211—214. 5. Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В. А., Романова И. А. Моделирование электрических характеристик полевых графеновых транзисторов с использованием упрощенной комбинированной модели // Материалы 26-й Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", 2016, Россия, Севастополь. Т. 7. С. 1534—1540.

6. Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В. А., Романова И. А. Комбинированные модели полевых графеновых транзисторов с одним и двумя затворами // Материалы 27-й Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", 2017, Россия, Севастополь. Т. 4. С. 1076—1083.

7. Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В. А., Романова И. А. Моделирование полевых графеновых транзисторов с одним и двумя затворами // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19, № 12. Р. 714—721.

8. Абрамов И. И. Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и наноэлектроники. VIII. Нанотранзисторы с МДП-структурой // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 9. С. 27—37; № 10. С. 28—41; № 11. С. 29—42.

9. Абрамов И. И. Основы моделирования элементов микро- и наноэлектроники. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. 444 с.

10. Абрамов И. И. Лекции по моделированию элементов интегральных схем. М. — Ижевск: НИЦ РХД, 2005. 152 с.

11. **Абрамов И. И.** Лекции по моделированию элементов интегральных схем микроэлектроники. Учеб. пособие. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 116 с.

12. **Thiele S. A., Schaefer J. A., Schwierz F.** Modeling of graphene metal-oxide-semiconductor field-effect transistors with gapless large-area graphene channels // J. Appl. Phys. 2010. V. 107. P. 094505-1—8.

13. **Tian J., Katsounaros A., Smith D., Hao Y.** Graphene field-effect transistor model with improved carrier mobility analysis // IEEE Trans. Electron. Dev. 2015. Vol. 62, N. 10. P. 3433–3440.

14. Landauer G. M., Jimenez D., Gonzalez J. L. An accurate Verilog-A compatible compact model for graphene field-effect transistors // IEEE Trans. Nanotechnol. 2014. Vol. 13, N. 5. P. 895–904.

15. **Thiele S. A., Schaefer J. A.** Modeling of the steady state characteristics of large-area graphene field-effect transistors // J. Appl. Phys. 2010. Vol. 110, N. 3. P. 034506-1–7.

16. **Абрамов И. И., Харитонов В. В.** Методы и алгоритмы трехмерного численного моделирования полупроводниковых приборов и структур // Электронное моделирование. 1990. Т. 12, № 5. С. 39–45.

17. **Абрамов И. И., Харитонов В. В.** Численное моделирование физических процессов в элементах и фрагментах кремниевых БИС и СБИС // Электронное моделирование. 1992. Т. 14, № 4. С. 49—56.

18. Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Игнатенко С. А., Королев А. В., Новик Е. Г., Рогачев А. И. Система моделирования наноэлектронных приборов — NANODEV // Микроэлектроника. 2003. Т. 32, № 2. С. 124—133.

19. Abramov I. I., Baranoff A. L., Goncharenko I. A., Kolomejtseva N. V., Bely Y. L., Shcherbakova I. Y. A nanoelectronic device simulation software system NANODEV: New opportunities // Proc. of SPIE. 2010. Vol. 7521. P. 75211E1-1—11.

20. **Абрамов И. И.** Физика и моделирование приборных структур и устройств микро- и наноэлектроники // Доклады БГУИР. 2014. № 2. С. 32—42.

21. Wang H., Hsu A., Antoniadis D. A., Palacios T. Compact virtual-source current-voltage model for top- and back-gated graphene field-effect transistors // IEEE Trans. Electron. Dev. 2011. Vol. 58, N. 5. P. 1523–1533.

I. I. Abramov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, nanodev@bsuir.edu.by, N. V. Kolomejtseva, Researcher, V. A. Labunov, Dr. Sci. (Tech.), Academician of NASB, Academician of RAS, Professor, Head of Laboratory, I. A. Romanova, Researcher, I. Y. Shcherbakova, Researcher,

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, 220013, Belarus

Corresponding author:

Abramov Igor I., Dr. Sci., Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, 220013, Belarus, nanodev@bsuir.edu.by

### Simulation of Transfer Characteristics of Dual-Gate Graphene Field-Effect Transistors

Received on June 20, 2018 Accepted on July 20, 2018

A simplified combined self-consistent model of the field-effect transistors based on a monolayer graphene (GFET) was developed for calculation of their transfer characteristics. As an example, the characteristics of a dual-gate GFET at various drain voltages were calculated. A good agreement was obtained between the simulation results carried out with the use of the proposed model and the experimental data.

The model is based on the equations of the quantum diffusion-drift model and it allows one to calculate the characteristics of the transistors on a monolayer graphene with various gate dielectrics. A number of important factors can be taken into account in the model, namely: 1) mobilities of electrons and holes; 2) quantum capacity; 3) resistances of the drain and the source and their possible difference. The important influence of these resistances on the transfer IV-characteristics of GFET is illustrated. The program that implements the model, is included in the nanoelectronic devices simulation system NANODEV.

Keywords: field-effect transistor, monolayer graphene, transfer IV-characteristic, combined model, simulation

#### For citation:

Abramov I. I., Kolomejtseva N. V., Labunov V. A., Romanova I. A., Shcherbakova I. Y. Simulation of Transfer Characteristics of Dual-Gate Graphene Field-Effect Transistors, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 11, pp. 643–650.

DOI: 10.17587/nmst.20.643-650

#### Introduction

A promising direction in the high-frequency nanoelectronics is development of the devices on the basis of carbon nanomaterials [1]. An intensive research goes on for development of the models of such devices, without which their development and optimization and. consequently, wide introduction in practice are impossible. Unfortunately, development of the models is a long and labor-consuming process, especially in case of construction and realization of highly-adequate numerical models [2]. At the same time the simple (compact) models, unfortunately, are not characterized by the necessary universality. Thus, the previously developed by us high-effective simplified models of the graphene field effect transistor (GFET) [3-7] are expedient for calculation of their output characteristics. Simulation of the transfer characteristics of GFET is more difficult.

The given article presents a description of the developed model of the dual-gate field transistors on the basis of a single-layer graphene. This model can be used for calculation of the transfer IV-characteristics of such transistors, and its possibilities are illustrated.

#### Model

The proposed model, just like the models presented in [3-7], was developed on the basis of the quantum diffusion-drift model [8, 9]. According to the classification [9-11], it can be classified as the combined model, because it is a combination of the physical and electrical models.

Let us consider this model.

At the first stage the quantum capacity of the model is calculated according to the simplified formula [12]:

$$C_q = \frac{2q^3}{\pi(\eta V_F)^2},\tag{1}$$

where q – electron charge;  $\eta$  – Planck constant divided by  $2\pi$ ;  $V_F = 10^6$  m/s – Fermi velocity.

After that, the capacities of the gates are calculated according to the following formula:

$$C_g = \frac{C_q C_{in}}{C_q + C_{in}},\tag{2}$$

where  $C_{in}$  — the capacity formed between the gate and the graphene layer.

Then, just like in the models described in [6, 7], the electrostatic potential of V is calculated in a self-consistent way with application of the iterative method. At that, the following formulas are used [12, 13]:

$$V = \frac{C_{gt}(V_{tg} - V_{tg0} - V_a) + C_{gb}(V_{beff} - V_a)}{C_{gt} + C_{gb} + \alpha C_q}; \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{1 + \frac{q^2 V^2}{(k T \ln(4))^2}} + 1 \right);$$
(4)

$$C_q = \frac{2q^3}{\pi(\eta V_F)^2} |V|,$$
 (5)

where  $C_{gt}$ ,  $C_{gb}$  — capacities of the top and back gates;  $\alpha$  — capacity coefficient ( $\alpha = 0,5$  at  $q|V| \gg kT$ );  $V_{tg}$  voltage on the top gate;  $V_{beff}$  — effective voltage on the back gate;  $V_{tg0}$  — Dirac voltage on the top gate; V electrostatic potential of the channel;  $V_a$  varies within the range from 0 up to  $V_{ch}$ ;  $V_{ch}$  — full voltage drop in the channel; k — Boltzmann constant; T — temperature of the environment.

A recalculation of the values is carried out in a selfconsistent way, till the variation of the electrostatic potential in the channel reaches the set level.

At the second stage on the basis of the obtained electrostatic potential in the channel the effective mobility of the charge carriers in graphene  $\mu$  is calculated, taking into account the mobilities of the electrons and the holes [13]:

$$\mu = \left(\frac{14(\mu_p - \mu_n)\left(\frac{\pi(kT)^2}{3(\eta V_F)^2} + \frac{q^2}{\pi(\eta V_F)^2}V^2\right)}{\left(\frac{\pi(kT)^2}{3(\eta V_F)^2} + \frac{q^2V^2 + \Delta^2}{\pi(\eta V_F)^2}\right)\sqrt{1 + \frac{q^2}{(kT\ln(4))^2}V^2}} + h\right) \times \frac{m}{m + V^2},$$
(6)

where  $\mu_p$  and  $\mu_n$  — mobilities of the electrons and the holes, accordingly;  $\Delta$  — heterogeneity of the electrostatic potential; *h* and *m* — agreement parameters of the model.

The total charge density of the graphene sheet of Q is determined in accordance with the following [14]:

$$Q = \frac{q\pi(kT)^2}{3(\eta V_F)^2} + \frac{q^3 V^2 + q\Delta^2}{\pi(\eta V_F)^2}.$$
 (7)

In order to find the drain current, the formula from the quantum diffusion-drift model, namely [3-7], is used:

$$I_{d} = \frac{W \int_{0}^{V_{ch}} \mu Q dV}{L + \left| \int_{0}^{V_{ch}} \frac{\mu}{V_{sat}} dV \right|},$$
(8)

where W – channel width; L – channel length;  $V_{sat}$  – saturation velocity.

The saturation velocity is calculated with account of scattering on the optical phonons on the basis of the model of [15]:

$$V_{sat} = \begin{cases} \frac{2 V_F}{\pi}, \text{ if } |Q_{net}| \le q |\rho_{crit}| \\ \frac{2 q \Omega}{\pi^2 \eta V_F |Q_{net}|} \sqrt{\frac{\pi (\eta V_F)^2 |Q_{net}|}{q} - (\frac{\eta \Omega}{2})^2}, & (9) \\ \text{if } |Q_{net}| > q |\rho_{crit}|, \end{cases}$$

$$\rho_{crit} = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{\Omega}{V_F} \right), \tag{10}$$

where  $\rho_{crit}$  — critical density of the charge carriers;  $Q_{net}$  — density of the charge carriers in the channel  $(Q_{net} = |\alpha C_q V|)$ ;  $\eta \Omega$  — effective energy of the optical phonons.

We should point out that, if the quantum phenomena and the voltage drops in the drain and the source areas are not taken into account, then  $V_{ch} = V_d (V_d$ the voltage applied to the drain relatively to the source), while formula (8) leads to a traditional diffusion-drift model, used by many authors (sometimes with modifications and corrections) during calculation of the drain current of GFET.

The problem with calculation of the transfer IV-characteristics of GFET is in the necessity to calculate the drain current of  $I_d$  at a fixed drain voltage  $V_d$ . There are no problems only, when the resistances of the drain  $R_d$ and the source  $R_s$  are not taken into account, that is, when  $R_d = R_s = 0$  [3, 6]. In the opposite, real, case (when  $R_d$  and  $R_s$  are not equal to 0), in order to take into account the voltage drops on these resistances, it is necessary to recalculate the current of drain  $I_d$ , in order to get a fixed voltage on drain  $V_d$ , that is, to apply the optimization method. We used a relatively simple method of dichotomy, which was quite satisfactory in more complex problems of a multidimensional numerical simulation of the fragments of silicon VLSI [16, 17].

The block diagram of the calculation is presented in fig. 1. The division of the section [a, b] is continued till its length becomes less than the set value of *eps* ( $K_1$  — also an empirical parameter). That means that at a variation of the voltage on the gate we get such drain current  $I_d$ , at which voltage  $V_{dnew}$  will remain approximately constant, if the resistances of the drain and the source are taken into account. In the algorithm the drain current is recalculated in the sequence, considered above, with account of the new integration limits. At the final stage, after  $I_d$  is found, the voltage drop on the resistance of source  $R_s$ , that is  $V_{tgs} = V_{tg} + R_s I_d$ .

The proposed model allows us to obtain a good agreement with the experimental data, because the electrostatic potential in the channel and the quantum capacity are calculated in a self-consistent way. As a rule, the parameters of the model in agreement between the calculations with the experimental data are the resistances at the drain of  $R_d$  and the source of  $R_s$ , and also *h* and *m* in the effective mobility (6).

The programs realizing the proposed model are included in NANODEV system for simulation of the nanoelectronic devices [18–20], being developed in BSUIR since 1995 and intended for PC.

#### Simulation results

With application of the proposed combined model, the transfer characteristics of the dual-gate GFET on a single-layer graphene were obtained. The calculations were carried out for a room temperature. The figures present the results for the drain current density for convenience of comparison with the experimental data.

Fig. 2 presents a cross-section of the dual-gate GFET on the basis of a single-layer graphene on a  $SiO_2/Si$  substrate. The back gate of the dual-gate GFET is separated from the channel by a  $SiO_2$  dielectric with thickness of 300 nm. The  $Al_2O_3$  layer with thickness of 15 nm is the dielectric of the top gate. The length of the channel  $L = 5 \mu m$ , and the other parameters of GFET are presented in [21]. The characteristics are calculated with account of the electron and hole conductivities.

Fig. 3 illustrates comparison of the simulation results obtained with the use of the proposed model with the experimental data [21] at different drain voltages. Curve 1 corresponds to  $V_d = 1,1$  V; curve  $2 - V_d = 0,85$  V; curve  $3 - V_d 0,6$  V;  $4 - V_d = 0,35$  V. We should point out that a good agreement of the simulation results using parameters h = 0,1 m<sup>2</sup>/(V · s), m = 0,063 V<sup>2</sup>,  $R_d = R_s = 30$   $\Omega$  with the experimental data [21] was obtained.

Fig. 4 presents the transfer characteristics of GFET at different resistances of drain  $R_d$  and source  $R_s$ . The calculations were done at the drain voltage  $V_d = 0,6$  V. We should point out that with an increase of the resistance the drain current falls. The results illustrate importance of accounting of the resistances of drain  $R_d$  and source  $R_s$  for simulation of the transfer IV-characteristics of GFET.

#### Conclusion

With the use of the developed combined model of the dual-gate field graphene transistors, the transfer characteristics of the devices were investigated at various drain voltages. The model is developed on the basis of the equations of the quantum diffusion-drift model and it allows us to calculate characteristics of the transistors on a single-layer graphene with various subgate dielectrics. According to the joint accounting in the model of several important factors, namely: 1) mobilities of the electrons and the holes; 2) quantum capacity; 3) the drain and source resistances and their possible difference, a satisfactory agreement with the experimental data for a number of the transfer characteristics of GFET was obtained. It was demonstrated the necessity of the use of a self-consistent calculation for finding of the electrostatic potential in an investigated device. The dichotomy method was applied for accounting of the drain and source resistances during simulation of the transfer characteristics. The important influence of the drain and source resistances on the transfer IV-characteristics of GFET was illustrated. The program realizing the model is included in the NANODEV system for simulation of the nanoelectronic devices.

The work was done within the framework of the Convergence State Program of the Scientific Research of the Republic of Belarus.

#### References

1. **Bystrov R. P., Guluaev Ju. V., Nikitov S. A., Sokolov A. V.** Mikro- i nanoelektronika primenitel'no k sistemam radiolokatsii i radiosvyazi, *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki*, 2010, no. 9, pp. 11–50 (in Russian).

2. Abramov I. I., Kolomejtseva N. V., Labunov V. A., Romanova I. A. Modelirovaniye rezonansno-tunnel'nykh pribornykh struktur na osnove uglerodnykh nanomaterialov, *Nanotekhnologii, razrabotka, primeneniye: XXI vek*, 2017, vol. 9, no. 3, pp. 3–11 (in Russian).

3. Abramov I. I., Labunov V. A., Kolomejtseva N. V., Romanova I. A. Simulation of field-effect transistors and resonant tunneling diodes based on graphene, *Proc. SPIE*, 2016, vol. 10224, pp. 102240V-1-10.

4. Abramov I. I., Labunov V. A., Kolomejtseva N. V., Romanova I. A. Modelirovaniye pribornykh struktur na osnove grafena. Sbornik nauchnykh trudov VII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Materialy i struktury sovremennoy elektroniki", Minsk, BGU, 2016, pp. 211–214 (in Russian). 5. Abramov I. I., Kolomejtseva N. V., Labunov V. A., Romanova I. A. Simulation of electrical characteristics of graphene field-effect transistors with the using of simple combined model, 26<sup>th</sup> International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo '2016), Sevastopol, Weber Publishing. 2016, vol. 7, pp. 1534–1540 (in Russian).

6. Abramov I. I., Kolomejtseva N. V., Labunov V. A., Romanova I. A. Combined models of graphene field-effect transistors with the single and dual gates. 27<sup>th</sup> International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2017), Sevastopol, Weber Publishing. 2017, vol. 4, pp. 1076–1083 (in Russian).

7. Abramov I. I., Kolomejtseva N. V., Labunov V. A., Romanova I. A. Simulation of the graphene field-effect transistors with single and dual gates, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2017, no. 12, pp. 714–721.

8. **Abramov I. I.** Problems and principles of physics and simulation of micro- and nanoelectronics devices. VIII. Nanoscale MOSFETs, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2010, no. 9, pp. 27–37; no. 10, pp. 28–41; no. 11, pp. 29–42 (in Russian).

9. Abramov I. I. Osnovy modelirovaniya elementov mikro- i nanoelektroniki, Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. 444 p. (in Russian).

10. Abramov I. I. Lektsii po modelirovaniyu elementov integral'nykh skhem, Moscow — Izhevsk, NIC RHD, 2005, 152 p. (in Russian).

11. **Abramov I. I.** *Lektsii po modelirovaniyu elementov integral'nykh skhem mikroelektroniki*, Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012, 116 p. (in Russian).

12. Thiele S. A., Schaefer J. A., Schwierz F. Modeling of graphene metal-oxide-semiconductor field-effect transistors with gapless large-area graphene channels, *J. Appl. Phys.*, 2010, vol. 107, pp. 094505-1–8.

13. Tian J., Katsounaros A., Smith D., Hao Y. Graphene field-effect transistor model with improved carrier mobility analysis, *IEEE Trans. Electron. Dev.*, 2015, vol. 62, no. 10, pp. 3433–3440.

14. Landauer G. M., Jimenez D., Gonzalez J. L. An accurate Verilog-A compatible compact model for graphene field-effect transistors, *IEEE Trans. Nanotechnol.*, 2014, vol. 13, no. 5, pp. 895–904.

15. **Thiele S. A., Schaefer J. A.** Modeling of the steady state characteristics of large-area graphene field-effect transistors, *J. Appl. Phys.* 2010, vol. 110, no. 3, pp. 034506-1-7.

16. Abramov I. I., Kharitonov V. V. Metody i algoritmy trekhmernogo chislennogo modelirovaniya poluprovodnikovykh priborov i struktur, *Elektronnoye modelirovaniye*, 1990, vol. 12, no. 5, pp. 39–45 (in Russian).

17. **Abramov I. I., Kharitonov V. V.** Chislennoye modelirovaniye fizicheskikh protsessov v elementakh i fragmentakh kremniyevyh BIS i SBIS, *Elektronnoye modelirovaniye*, 1992, vol. 14, no. 4, pp. 49–56 (in Russian).

18. Abramov I. I., Goncharenko I. A., Ignatenko S. A., Korolev A. V., Novik E. G., Rogachev A. I. NANODEV: A nanoelectronic device simulation software system, *Russian Microelectronics*, 2003, vol. 32, no. 2, pp. 97–104.

19. Abramov I. I., Baranoff A. L., Goncharenko I. A., Kolomejtseva N. V., Bely Y. L., Shcherbakova I. Y. A nanoelectronic device simulation software system NANODEV: New opportunities, *Proc. of SPIE*, 2010, vol. 7521. P. 75211E1-1–11.

20. **Abramov I. I.** Fizika i modelirovaniye pribornykh struktur i ustroystv mikro- i nanoelektroniki, *Doklady BGUIR*, 2014, no. 2, pp. 32–42 (in Russian).

21. Wang H., Hsu A., Antoniadis D. A., Palacios T. Compact virtual-source current-voltage model for top- and back-gated graphene field-effect transistors, *IEEE Trans. Electron. Dev.*, 2011, vol. 58, no. 5, pp. 1523–1533.

**И. А. Глинский,** мл. науч. сотр., ИСВЧПЭ РАН, аспирант, РТУ МИРЭА, e-mail: glinskiy.igor@yandex.ru,

Федеральное государственное автономное научное учреждение Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В. Г. Мокерова Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН), г. Москва,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "МИРЭА — Российский технологический университет" (РТУ МИРЭА), г. Москва

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАЗМОННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РЕШЕТОК ДЛЯ ФОТОПРОВОДЯЩИХ АНТЕНН

#### Поступила в редакцию 31.05.2018

Проведено исследование взаимодействия лазерных импульсов фемтосекундной длительности с плазмонной металлической решеткой с помощью электромагнитного моделирования методом конечных элементов. Показано, что в области краев металла плазмонной решетки наблюдается резкое усиление электрического поля, вызванное возбуждением поверхностных плазмонных мод, при этом максимум напряженности электрического поля зависит от высоты плазмонного электрода антенны. Показано, что использование плазмонной решетки с высотой плазмонного электрода 100 нм приводит к увеличению максимума напряженности электрического поля в 3 раза при лазерной накачке с длиной волны 800 нм и в 2 раза при лазерной накачке с длиной волны 1,03 мкм.

**Ключевые слова:** терагерцовое излучение, фотопроводящие антенны, плазмонные антенны, плазмонная решетка, оптико-терагерцовая конверсия

#### Введение

Фотопроводящие антенны (ФПА) широко используют в современных системах терагерцовой (ТГц) спектроскопии и визуализации для передачи импульсного и непрерывного ТГц сигнала [1—6]. Среди прочих источников ТГц излучения они работают при комнатной температуре и имеют широкий спектр генерации излучения до 4...5 ТГц. Однако у современных традиционных ФПА эффективность преобразования оптического излучения фемтосекундного лазера в электромагнитные колебания ТГц диапазона по-прежнему остается невысокой (~ $10^{-5}...10^{-4}$ ) [1, 2].

Наиболее успешным методом повышения эффективности оптико-терагерцовой конверсии является использование металлических плазмонных решеток [4]. В работах [7, 8] было впервые теоретически показано, что использование решеточной структуры может заметно увеличить интенсивность генерации ТГц излучения за счет возбуждения поверхностных плазмонных мод. В работе [9] экспериментально продемонстрировано в 50 раз более сильное ТГц излучение плазмонного фотопроводящего эмиттера по сравнению с аналогичным фотопроводящим эмиттером без плазмонных электродов. Также показано, что чувствительность обнаружения ТГц плазмонного фотопроводящего детектора в 30 раз выше по сравнению с аналогичным фотопроводящим детектором без плазмонных

контактных электродов. Позже в работах [10, 11] было экспериментально продемонстрировано увеличение выходной мощности ТГц излучения до 3,8 мкВт при оптической накачке 240 мВт в диапазоне 0,1...5,0 ТГц за счет использования плазмонных наноантенн, формируемых на поверхности фотопроводника, а в работе [12] авторы добились рекордной на сегодняшний день эффективности преобразования оптического излучения в терагерцовое ~7,5 % и мощности генерации 105 мкВт за счет использования трехмерных плазмонных электродов. Таким образом, применение подобных структур приводит к более эффективному преобразованию оптического излучения в терагерцовое излучение по сравнению с традиционными конструкциями.

В настоящей работе было проведено исследование отклика плазмонной металлической решетки для ФПА на основе SI-GaAs при воздействии на нее лазерными импульсами фемтосекундной длительности с помощью электромагнитного моделирования методом конечных элементов.

#### Механизмы возбуждения поверхностных плазмонных волн

Поверхностные плазмонные волны (ППВ), или плазмон-поляритоны, — это связанные колебания электромагнитной волны и плотности электронного газа (свободных электронов) [13—16, 18]. ППВ распространяются вдоль границы между двумя средами и существуют в каждой из них, одна из которых является оптически активной. При этом глубина проникновения поля ППВ в поверхностноактивную среду значительно меньше, чем в неактивную. Как правило, ППВ распространяются на границе металл/диэлектрик. Металл необходим для существования электронной плазмы, а диэлектрик — для того, чтобы связать электронную плазму с электромагнитным полем, т. е. с объемной световой волной.

Электромагнитные поля, связанные с ППВ, сильно локализованы вблизи поверхности. Это обусловлено тем, что все методы возбуждения ППВ имеют резонансный характер (роль резонатора играет граница раздела сред  $\varepsilon_m/\varepsilon_d$ ), поэтому у границы имеет место резонансное усиление напряженности поля падающей плоской световой волны примерно в 10<sup>2</sup>...10<sup>3</sup> раз [13, 15]. ППВ может существовать только как частично продольная ТМ-волна (Зоммерфельд, 1907 г.), а постоянная распространения ППВ k<sub>sp</sub> через диэлектрические проницаемости обеих сред зависит от частоты ω. Эта так называемая дисперсионная зависимость описывает свойства поверхностных поляритонов и определяет, в частности, их фазовую и групповую скорости [15]:

$$k_{sp} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon_m \varepsilon_d}{\varepsilon_m + \varepsilon_d}}.$$
 (1)

Условием распространения ППВ является то, что среды имеют диэлектрическую проницаемость разных знаков:

$$\varepsilon_m < 0, \quad |\varepsilon_m| > \varepsilon_d.$$
 (2)

Оптические свойства электронного газа (плазмы) определяются соотношением частоты его собственных колебаний, или плазменной частоты, частоты электронных столкновений и частоты света и могут быть рассчитаны в приближении модели Друде — Лоренца [17]:

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_{plasm}^2}{\omega^2 + i\omega\Gamma},$$
(3)

где  $\varepsilon(\omega)$  — комплексная диэлектрическая проницаемость;  $\omega$  — угловая частота;  $\omega_{plasm}$  — плазменная

частота  $\left(\omega_{plasm} = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\varepsilon_0 m_e}}\right); \Gamma$  — частота электронных

столкновений;  $n_e$  — концентрация электронов проводимости (свободных электронов); e — заряд электрона;  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума.

Зная комплексную диэлектрическую проницаемость для необходимого диапазона частот, мы можем определить показатель преломления материала  $\tilde{n}$  и его коэффициент поглощения  $\alpha$ :

$$\tilde{n} = n + ik = \sqrt{\varepsilon(\omega)}; \qquad (4)$$

$$\alpha = \frac{2\omega}{c} \operatorname{Im}(k), \tag{5}$$

где *n* и k — действительная и мнимая части комплексного показателя преломления соответственно;  $\alpha$  — коэффициент поглощения (см<sup>-1</sup>); *c* — скорость света.

К настоящему времени существуют два эффективных метода возбуждения ППВ: призменный, в схемах нарушенного полного внутреннего отражения Отто или Кретчмана и дифракционное возбуждение на решетках [13—16]. Дифракционные решетки рассеивают излучение под определенными углами. Когда при некоторых углах падения света θ волна оказывается направленной вдоль поверхности, она представляет собой ППВ [14].

# Расчет плазмонной решетки для фотопроводящих антенн

Для возбуждения поверхностных плазмонных волн в ФПА было предложено реализовать контакты антенны с плазмонной решеткой, которая представляет собой систему штыревых электродов, расположенных с каждой стороны зазора ФПА, и служит для увеличения эффективности преобразования фемтосекундного импульса в электромагнитные колебания терагерцового диапазона (рис. 1, см. вторую сторону обложки). Электроды плазмонной решетки выполнены из золота и лежат на поверхности фотопроводящего слоя GaAs, а их высота варьируется от 20 до 120 нм при периоде решетки ~200 нм.

Определение оптимальной геометрии плазмонной решетки было выполнено с помощью моделирования методом конечных элементов с применением современного программного обеспечения COMSOL Multiphysics, которое позволяет проводить моделирование двумерных и трехмерных электромагнитных полей на основе системы уравнений Максвелла с использованием векторных граничных элементов [18].

Для исследования отклика плазмонной решетки при воздействии на нее лазерными импульсами фемтосекундной длительности были использованы значения частотно зависимого показателя преломления для Au из работы [17] при длинах волн падающего излучения  $\lambda$  от 500 нм до 300 мкм. Таким образом возможно исследовать электромагнитные процессы в плазмонной ФПА не только при воздействии на нее оптическим излучением ( $\lambda \approx 700...1600$  нм), но и при облучении ТГц излучением ( $\lambda \approx 50...300$  мкм), что актуально при использовании ФПА в качестве детектора. Значения показателя преломления для фотопроводящего слоя GaAs были взяты из работы [19].

Моделирование плазмонной решетки было реализовано в поперечном сечении (хг-плоскость). Прохождение электромагнитной волны задается с использованием граничных условий входного и выходного порта соответственно. Поскольку поверхностные плазмонные волны возбуждаются лишь при *р*-поляризации (TM), вектор напряженности магнитного поля падающей волны перпендикулярен плоскости моделирования (*хz*-плоскость). Для экономии машинных ресурсов был рассчитан участок плазмонной решетки, ограниченный несколькими электродами. Использование граничного условия Periodic Condition позволяет применить полученные результаты ко всей плазмонной решетке, состоящей из ~50...100 электродов. Для сравнения было также проведено моделирование традиционной ФПА в ху-плоскости.

#### Результаты и их обсуждение

Проведенный электромагнитный расчет традиционной и плазмонной ФПА методом конечных элементов при накачке 800 нм показал, что в области краев металла плазмонной решетки при высоте электродов 100 нм и периоде решетки 200 нм (рис. 2, а, см. вторую сторону обложки) наблюдается резкое усиление электрического поля, вызванное возбуждением поверхностных плазмонных мод [8]. Таким образом, в области зазора между контактами ФПА на достаточно большой площади (~20 мкм<sup>2</sup>) возможно увеличение максимума напряженности электрического поля на порядок по сравнению с традиционной ФПА (рис. 2, *b*). Кроме того, непосредственный контакт плазмонной решетки с электродами ФПА позволяет увеличить площадь контакта антенны с той частью полупроводника, где происходит генерация носителей заряда. Это обстоятельство позволяет максимальному числу фотовозбужденных носителей заряда достичь контактов ФПА, что дает дополнительный вклад в значение фототока [18, 20].

При этом максимум напряженности электрического поля зависит от высоты плазмонной решетки (рис. 3). На графике видно, что реализация плазмонной решетки с высотой 100 нм приводит к увеличению максимума напряженности электрического поля в 3 раза при оптической накачке 800 нм и в 2 раза при оптической накачке 1,03 мкм по сравнению плазмонной решеткой высотой 20 нм.



Рис. 3. Зависимость максимума напряженности электрического поля от высоты электродов плазмонной решетки при оптической накачке 0,8 и 1,03 мкм

Fig. 3. Dependence of the maximum of the intensity of the electric field on the height of the electrodes of the plasmonic grating at the optical pumping of 0.8 and 1.03  $\mu$ m



**Puc. 4. Спектр пропускания плазмонной решетки высотой 100 нм и периодом 200 нм при оптической накачке от 0,7 до 1,6 мкм** Fig. 4. Transmission spectrum of the plasmonic grating with the height of 100 nm and the period of 200 nm at the optical pumping from 0.7 up to 1.6  $\mu$ m

Однако изготовление металлизации 100 нм и более ограничивается технологическими трудностями.

Для плазмонной решетки высотой 100 нм и периодом 200 нм также был получен спектр пропускания (рис. 4). Видно, что при накачке оптическим излучением в диапазоне длин волн 780...800 нм плазмонная решетка пропускает 40 % падающего излучения и до 60 % при длинноволновой накачке на 1,5 мкм. Отметим, что пропускание на уровне 60...70 % падающего излучения сохраняется и на



Рис. 5. Зависимость отражения плазмонной решетки, покрытой слоем диэлектрика  $Al_2O_3$  (20 нм), от высоты электродов плазмонной решетки при оптической накачке 800 нм

Fig. 5. Dependence of the reflection of a plasmonic grating covered with a dielectric layer of  $Al_2O_3$  (20 nm) on the height of the electrodes of the plasmonic grating at the optical pumping of 800 nm

длинах волн порядка 300 мкм, что важно для детектирования ТГц излучения.

Свойства плазмонной решетки могут значительно меняться при использовании пассивирующего диэлектрика. Так, например, покрытие плазмонной структуры слоем диэлектрика  $Al_2O_3$  толщиной 20 нм может уменьшить отражение плазмонной решетки на 86 % при высоте металла 100 нм (рис. 5).

Таким образом, электромагнитное моделирование является мощным инструментом проектирования и оптимизации топологии плазмонных решеток для создания ФПА с повышенной эффективностью оптико-терагерцовой конверсии.

#### Заключение

В работе проведено исследование взаимодействия лазерных импульсов фемтосекундной длительности с плазмонной решеткой с помощью электромагнитного моделирования методом конечных элементов. Получены картины распределения электрического поля в традиционной ФПА и в плазмонной ФПА. Показано, что в области краев металла плазмонной решетки наблюдается резкое усиление электрического поля, вызванное возбуждением поверхностных плазмонных мод, при этом максимум напряженности электрического поля зависит от высоты плазмонной решетки. Реализация плазмонной решетки с высотой 100 нм приводит к увеличению максимума напряженности электрического поля в 3 раза при оптической накачке 800 нм и в 2 раза при оптической накачке 1,03 мкм по сравнению плазмонной решеткой высотой 20 мкм. Однако изготовление металлизации 100 нм и более ограничивается технологическими трудностями. Для плазмонной решетки высотой 100 нм и периодом 200 нм также был получен спектр пропускания, из которого видно, что 40 % падающего излучения проходит через решетку при накачке оптическим излучением в диапазоне длин волн 780...800 нм и 60 % при длинноволновой накачке на 1,5 мкм. В то же время пропускание на уровне 60...70 % падающего излучения сохраняется и на длинах волн порядка 300 мкм, что важно для детектирования терагерцового излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РНФ № 18-79-10195 и ФСИ № 13099ГУ/2018.

#### Список литературы

1. Глинский И. А., Хабибуллин Р. А., Пономарев Д. С. Интегральная эффективность оптико-терагерцовой конверсии в фотопроводящих антеннах на основе LT GaAs и In0.38Ga0.62As // Микроэлектроника. 2017. Т. 46, № 6. С. 444—450.

2. Khiabani N., Huang Y., Shen Y., Boyes S. Theoretical Modeling of a Photoconductive Antenna in a Terahertz Pulsed System // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2013. Vol. 61, N. 4. P. 1538–1546.

3. Lavrukhin D. V., Katyba G. M., Yachmenev A. E., Galiev R. R., Glinskiy I. A., Khabibullin R. A., Goncharov Y. G., Spektor I. E., Khusyainov D. I., Buryakov A. M., Mishina E. D., Chernomyrdin N. V., Zaytsev K. I., Ponomarev D. S. Numerical simulations and experimental study of terahertz photoconductive antennas based on GaAs and its ternary compounds // Proc. SPIE 10680, Optical Sensing and Detection. 2018. Vol. 10680. P. 106801M (7 p.)

4. Lepeshov S., Gorodetsky A., Krasnok A., Rafailov E., Belov P. Enhancement of Terahertz Photoconductive Antennas and Photomixers Operation by Optical Nanoantennas // Laser & Photonics Reviews. 2017. Vol. 11, N. 1. P. 1600199 (20 p.)

5. Пономарев Д. С., Хабибуллин Р. А., Ячменев А. Э., Павлов А. Ю., Слаповский Д. Н., Глинский И. А., Лаврухин Д. В., Рубан О. А., Мальцев П. П. Электрические и тепловые свойства фотопроводящих антенн на основе  $\ln xGa_{1-x}As (x > 0,3)$  с метаморфным буферным слоем для генерации терагерцового излучения // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51, № 9. С. 1267—1272.

6. Бугаев А. С., Глинский И. А., Пушкарев С. С., Лаврухин Д. В., Ячменев А. Э., Хабибуллин Р. А., Пономарев Д. С. Разработка материалов и фотопроводящих антенн на их основе для генерации и детектирования импульсного и непрерывного терагерцового (ТГц) излучения // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19, № 5. С. 294—302.

7. Catrysse P. B., Veronis G., Shin H., Shen J. T., Fan S. Guided modes supported by plasmonic films with a periodic arrangement of subwavelength slits // Applied Physics Letters. 2006. Vol. 88. P. 031101 (4 p.)

8. **Hseieh B.-Y., Jarrahi M.** Analysis of periodic metallic nano-slits for efficient interaction of terahertz and optical waves at nano-scale dimensions // Journal Of Applied Physics. 2011. Vol. 109. P. 084326 (6 p.)

9. Berry C. W., Wang N., Hashemi M. R., Unlu M., Jarrahi M. Significant performance enhancement in photoconductive terahertz optoelectronics by incorporating plasmonic contact electrodes // Nature Communications. 2013. Vol. 4. P. 1622 (10 p.)

10. Yardimci N. T., Yang S.-H., Berry C. W., Jarrahi M. Terahertz Radiation Enhancement in Large-Area Photoconductive Sources by Using Plasmonic Nanoantennas // Proc. Conference of Lasers and Electro-Optics. San Jose. CA. 2015. May 10–15.

11. **Yardimci N. T., Jarrahi M.** 3.8 mW terahertz radiation generation over a 5 THz radiation bandwidth through large area plasmonic photoconductive antennas // IEEE MTT-S International Microwave Symposium. 2015. (2 p.)

12. Yang S.-H., Hashemi M. R., Berry C. W., Jarrahi M. 7.5 % Optical-to-Terahertz Conversion Efficiency Offered by Photoconductive Emitters with Three-Dimensional Plasmonic Contact Electrodes // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2014. Vol. 4. P. 575–581.

13. Поверхностные поляритоны. Электромагнитные волны на поверхностях и границах раздела сред / Под ред. В. М. Аграновича, Д. Л. Миллса. М.: Наука, 1985. 525 с.

14. Bonch-Bruevich A. M., Libenson M. N., Makin V. S., Trubaev V. V. Surface electromagnetic waves in optics // Optical Engineering. 1992. Vol. 31, N. 4. P. 718–730.

15. Genet C., Ebbesen T. W. Light in tiny holes // Nature. 2007. Vol. 445, N. 7123. P. 39-46.

16. **Либенсон М. Н.** Поверхностные электромагнитные волны оптического диапазона // Соросовский образоват. журнал. 1996. № 10. С. 93–98.

17. Ordal M. A., Long L. L., Bell R. J., Bell S. E., Bell R. R., Alexander R. W., Jr., Ward C. A. Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared // Applied Optics. 1983. Vol. 22, N. 7. P. 1099–1120.

18. **Burford N., El-Shenawee M.** Computational modeling of plasmonic thin-film terahertz photoconductive antennas // Journal of the Optical Society of America B. 2016. Vol. 33, N. 4. P. 748–759.

19. Kischkat J., Peters S., Gruska B., Semtsiv M., Chashnikova M., Klinkmüller M., Fedosenko O., Machulik S., Aleksandrova A., Monastyrskyi G., Flores Y., Masselink W. T. Mid-infrared optical properties of thin films of aluminum oxide, titanium dioxide, silicon dioxide, aluminum nitride, and silicon nitride // Appl. Opt. 2012. Vol. 51. P. 6789–6798.

20. Lepeshov S., Gorodetsky A., Krasnok A., Toropov N., Vartanyan T. A., Belov P., Alu A., Rafailov E. U. Boosting Terahertz Photoconductive Antenna Performance with Optimised Plasmonic Nanostructures // Scientific Reports. 2018. Vol. 8, N. 6624. P. 1–7.

**I. A. Glinskiy,** Junior Researcher, Graduate Student RTU MIREA, e-mail: glinskiy.igor@yandex.ru, V. G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy of Sciences (IUHFSE RAS), Moscow, 117105, Russian Federation;

MIREA – Russian Technological University (RTU MIREA), Moscow, 119454, Russian Federation

#### Corresponding author:

**Glinskiy Igor A.**, Junior Researcher Scientist, Graduate Student RTU MIREA, V. G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy of Sciences (IUHFSE RAS), Moscow, 117105, Russian Federation; MIREA – Russian Technological University (RTU MIREA), Moscow, 119454, Russian Federation, e-mail: glinskiy.igor@yandex.ru

### **Electromagnetic Modeling of Plasmonic Metal Gratings for the Photoconductive Antennas**

Received on May 31, 2018 Accepted on June 20, 2018

This work presents interaction of the laser pulses of the femtosecond duration with plasmonic gratings by means of electromagnetic simulation, the finite element method. The author demonstrates that a sharp increase in the electric field is observed in the area of the edges of the plasmonic lattice metal, caused by excitation of the surface, plasmonic modes. He shows that the use of a plasmonic grating with the height of a plasmonic electrode of 100 nm leads to a 3 times increase of the maximum of the electric field strength with the laser pumping at the wavelength of 800 nm and a 2 times increase with the laser pumping at the wavelength of  $1.03 \mu m$ .

**Keywords:** terahertz radiation, photoconductive antenna, plasmonic antennas; plasmonic gratings, efficiency of the optical-toterahertz conversion

For citation:

**Glinskiy I. A.** Electromagnetic Modeling of Plasmonic Metal Gratings for the Photoconductive Antennas, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 11, pp. 651–658.

DOI: 10.17587/nmst.20.651-658

#### Introduction

Photoconductive antennas (PCA) are used in the systems of the terahertz (THz) spectroscopy and visualization for transmission of the pulse and continuous THz signals [1–6]. Among other sources of THz radiation they work at a room temperature and have a wide

range of generation of radiation up to 4—5 THz. However, the traditional PCA still have a low efficiency of transformation of the optical radiation of the femtosecond laser into electromagnetic fluctuations of the THz range ( $\sim 10^{-5}...10^{-4}$ ) [1, 2].

The most successful method for increase of the efficiency of the optical-terahertz conversion is the use of

the metal plasmonic gratings [4]. In [7, 8] for the first time it was theoretically demonstrated, that the use of the grating structures can increase considerably the intensity of generation of the THz radiation due to excitation of the surface plasmonic modes. In [9] it was experimentally demonstrated that the THz radiation of the plasmonic photoconductive emitter was 50 times stronger in comparison with a similar photoconductive emitter without the plasmonic electrodes. It was also demonstrated, that the sensitivity of detection of a THz plasmonic photoconductive detector was 30 times higher in comparison with a similar photoconductive detector without the plasmonic contact electrodes. Later, in [10, 11] an increase was experimentally demonstrated of the output power of the THz radiation up to 3.8  $\mu$ W at the optical pumping of 240  $\mu$ W in the range of 0.1...5.0 THz due to the use of the plasmonic nanoantennas formed on the surface of the photoconductor, while the authors in their work achieved a record high up till now efficiency of transformation of the optical terahertz radiation ~7.5 % and generation power of 105 µW due to the use of the 3D plasmonic electrodes. Thus, application of such structures leads to a more effective transformation of the optical radiation into the terahertz radiation in comparison with the traditional designs.

The given work presents a research of the response of the plasmonic metal grating for PCA on the basis of SI-GaAs under the influence on it of the laser pulses of the femtosecond duration by means of the electromagnetic modeling by the method of finite elements.

#### Mechanisms for excitation of the surface plasmonic waves

The surface plasmonic waves (SPW) or plasmonpolaritons are coupled oscillations of an electromagnetic wave and density of the electron gas (free electrons) [13–16, 18]. SPW propagate along the border between two environments and exist in each of them, one of which is optically active. At that, the depth of penetration of SPW field into the surface-active environment is considerably less, than in the inactive one. As a rule, SPW propagate along the metal/dielectric border. Metal is necessary for existence of the electron plasma, and the dielectric — for connection of the electron plasma with the electromagnetic field, i.e. with a volumetric light wave.

The electromagnetic fields connected with SPW are strongly localized near the surface. This is due to the fact that all the methods of excitation of SPW have a resonant character (the role of the resonator is played by the section border of  $\varepsilon_m/\varepsilon_d$  environments), therefore, at the border there is a resonant strengthening of the field intensity of a falling flat light wave approximately in  $10^2...10^3$  times [13, 15]. SPW can exist only as

a partially longitudinal TM-wave (Sommerfield, 1907), while the constant of distribution of SPW  $k_{sp}$  through the dielectric permeabilities of both environments depends on the frequency  $\omega$ . This so-called dispersive dependence describes the properties of the surface polaritons and defines, in particular, their phase and group speeds [15]:

$$k_{sp} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon_m \varepsilon_d}{\varepsilon_m + \varepsilon_d}}.$$
 (1)

A condition for distribution of SPW is that the environments have dielectric permeabilities of different signs:

$$\varepsilon_m < 0, \quad |\varepsilon_m| > \varepsilon_d.$$
 (2)

The optical properties of the electron gas (plasma) are determined by a correlation of the frequency of its own fluctuations, or plasma frequency, frequency of the electron collisions and frequency of light, and can be calculated in approximation of Drude — Lorentz model [17]:

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_{plasm}^2}{\omega^2 + i\omega\Gamma},$$
(3)

where  $\varepsilon(\omega)$  — complex dielectric permeability;  $\omega$  — angular frequency;  $\omega_{plasm}$  — plasma frequency

$$\left(\omega_{plasm} = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\varepsilon_0 m_e}}\right); \ \Gamma \ - \ \text{frequency of the electron col-}$$

lisions;  $n_e$  — concentration of the electron conductivity (free electrons); e — electron charge; dielectric permeability of vacuum.

Knowing the complex dielectric permeability, we can determine the refractive index of material  $\tilde{n}$  and its absorption coefficient  $\alpha$ :

$$\tilde{n} = n + ik = \sqrt{\varepsilon(\omega)}; \qquad (4)$$

$$\alpha = \frac{2\omega}{c} \operatorname{Im}(k), \tag{5}$$

where *n* and *k* — real and imaginary parts of the complex index of refraction accordingly;  $\alpha$  — absorption coefficient (cm<sup>-1</sup>); *c* — velocity of light.

There are two effective methods for excitation of SPW: a prismatic one, in the schemes of broken total internal reflection of Otto or Kretschmann, and a diffraction excitation on gratings [13–16]. The diffraction gratings propagate radiation at certain angles. When, at certain angles of falling of light  $\theta$  a wave appears directed along the surface, it becomes a SPW [14].

# Calculation of the plasmonic gratings for the photoconductive antennas

For excitation of the surface plasmonic waves in PCA it was proposed to realize contacts of the antenna with a plasmonic grating, which represents a system of pin electrodes located from each side of the PCA gap, and serves for an increase of the efficiency of transformation of a femtosecond pulse into the electromagnetic fluctuations of the terahertz range (fig. 1, see the  $2^{nd}$  side of cover). Electrodes of the plasmonic gratings are made of gold and lay on the surface of the photoconductive layer of GaAs, and their height varies from 20 up to 120 nm at the grating period of ~200 nm.

Determination of the optimal geometry of a plasmonic grating was done by means of modeling by the method of the finite elements with application of COMSOL Multiphysics software, which allows us to do modeling of the two-dimensional and three-dimensional electromagnetic fields on the basis of the system of Maxwell equations with the use of the vector boundary elements [18].

For research of the response of a plasmonic grating under the influence on it of the laser pulses of a femtosecond duration, the values were used of the frequency dependent index of refraction for Au from [17] at the wavelengths of the falling radiation  $\lambda$  from 500 nm up to 300 µm. Thus, it is possible to investigate the electromagnetic processes in plasmonic PCA under the influence on it of not only an optical radiation ( $\lambda \approx 700...1600$  nm), but also of THz radiation ( $\lambda \approx 50...300$  µm), which is important for the use of PCA as a detector. The values of the refraction index for GaAs photoconductor layer were taken from [19].

Modeling of a plasmonic grating is realized in the cross-section (xz plane). Passage of an electromagnetic wave is set with the use of the boundary conditions of the input and output ports, accordingly. Since the surface plasmonic waves are excited only at p polarization (TM), the vector of the intensity of the magnetic field of a falling wave is perpendicular to the plane of modeling (xz plane). For saving of the machine resources, a section of a plasmonic grating limited by several electrodes was calculated. The use of the boundary *Periodic Condition* allows us to apply the received results to all of the plasmonic grating consisting of ~50...100 electrodes. For comparison reasons, also modeling of the traditional PCA was done in the xy plane.

#### Results and their discussion

The carried out electromagnetic calculation of the traditional and plasmonic PCA by the method of the finite elements at a pumping of 800 nm demonstrated that in the area of the metal edges of the plasmonic

grating at the height of the electrodes of 100 nm and the period of a grating of 200 nm (fig. 2, a, see the  $2^{nd}$  side of cover) a sharp strengthening of the electric field was observed caused by excitation of the surface plasmonic modes [8]. Thus, in the area of the gap between the PCA contacts on a sufficiently big area (~20  $\mu$ m<sup>2</sup>) it is possible to increase the maximum of the intensity of the electric field by an order in comparison with the traditional PCA (fig. 2, b, see the 2<sup>nd</sup> side of cover). Besides, a direct contact of a plasmonic grating with PCA electrodes allows us to increase the area of the contact of the antenna with that part of the semiconductor, where the generation of the charge carriers takes place. This circumstance makes it possible for the maximal number of the photoexcited charge carriers to reach the PCA contacts, which gives an additional contribution to the value of the photocurrent [18, 20].

At that, the maximum of the intensity of the electric field depends on the height of the plasmonic grating (fig. 3). It is visible that a realization of the plasmonic grating with the height of 100 nm leads to a 3 times increase of the maximal intensity of the electric field at an optical pumping of 800 nm and a 2 times increase at the optical pumping of 1.03  $\mu$ m in comparison with the plasmonic grating with the height of 20 nm. However, manufacturing of metallization of 100 nm and over is limited by technological problems.

For a plasmonic grating with the height of 100 nm and a period of 200 nm also a transmission spectrum was received (fig. 4). It is visible, that in case of pumping by optical radiation in the range of the wavelengths of 780...800 nm the plasmonic grating lets pass 40 % of the falling radiation and up to 60 % in the case of a long-wave pumping on 1.5  $\mu$ m. We should point out that transmission at the level of 60...70 % of the falling radiation remains on the wavelengths of about 300  $\mu$ m, which is important for detection of the THz radiation.

The properties of a plasmonic grating can vary considerably, when a passivating dielectric is used. Thus, for example, covering of a plasmonic structure by a dielectric layer of  $Al_2O_3$  with thickness of 20 nm can reduce the reflexion of the plasmonic grating by 86 % at the height of metal of 100 nm (fig. 5).

Thus, the electromagnetic modeling is a powerful tool for designing and optimization of the topology of the plasmonic gratings for development of PCA with higher efficiency of the optical-terahertz conversion.

#### Conclusion

The work presents a research of the interaction of the laser pulses of the femtosecond duration with a plasmonic grating by means of an electromagnetic modeling by the method of the finite elements. Pictures were obtained of distribution of the electric field in the

traditional PCA, and in the plasmonic PCA. It was demonstrated, that in the area of the metal edges of the plasmonic grating there was a sharp strengthening of the electric field caused by the excitation of the surface plasmonic modes, at that, the maximum of the intensity of the electric field depended on the height of the plasmonic grating. Realization of the plasmonic grating with the height of 100 nm leads to a 3 times increase of the maximum of the intensity of the electric field at the optical pumping of 800 nm and a 2 times increase at the optical pumping of 1.03  $\mu$ m, in comparison with the plasmonic grating with the height of 20 µm. However, manufacturing of a metallization of 100 nm and over is limited by technological problems. For the plasmonic gratings with the height of 100 nm and period of 200 nm a spectrum of transmission was also received, from which it is visible, that 40 % of the falling radiation passed through a grating at a pumping by the optical radiation in the range of the wavelengths of 780...800 nm and 60 % — at a long-wave pumping on 1.5  $\mu$ m. At the same time, the transmission at the level of 60...70 % of the falling radiation remained also on the wavelengths of about 300 µm, which is important for detection of THz radiation.

The work was done with the financial support of RSF grant  $N_{0}$  18-79-10195 and FASIE grant  $N_{0}$  13099 $\Gamma Y/2018$ .

#### References

1. Glinskiy I. A., Khabibullin R. A., Ponomarev D. S. Total efficiency of optical-to-terahertz conversion in photoconductive antennas based on LT GaAs and In0.38Ga0.62As, *Russian Microelectronics*, 2017, vol. 46, no. 6, pp. 408–413.

2. Khiabani N., Huang Y., Shen Y., Boyes S. Theoretical Modeling of a Photoconductive Antenna in a Terahertz Pulsed System, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, vol. 61, no. 4, pp. 1538–1546.

3. Lavrukhin D. V., Katyba G. M., Yachmenev A. E., Galiev R. R., Glinskiy I. A., Khabibullin R. A., Goncharov Y. G., Spektor I. E., Khusyainov D. I., Buryakov A. M., Mishina E. D., Chernomyrdin N. V., Zaytsev K. I., Ponomarev D. S. Numerical simulations and experimental study of terahertz photoconductive antennas based on GaAs and its ternary compounds, *Proc. SPIE 10680, Optical Sensing and Detection V*, 2018, vol. 10680, pp. 106801M (7 p.)

4. Lepeshov S., Gorodetsky A., Krasnok A., Rafailov E., Belov P. Enhancement of Terahertz Photoconductive Antennas and Photomixers Operation by Optical Nanoantennas, *Laser & Photonics Reviews*, 2017, vol. 11, no. 1, pp. 1600199 (20 p.)

5. Ponomarev D. S., Habibullin R. A., Yachmenev A. Eh., Pavlov A. Yu., Slapovskij D. N., Glinskij I. A., Lavruhin D. V., Ruban O. A., Mal'cev P. P. EHlektricheskie i teplovye svojstva fotoprovodyashchih antenn na osnove  $InxGa_{1-x}As \ (x > 0.3)$  s metamorfnym bufernym sloem dlya generacii teragercovogo izlucheniya, *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2017, vol. 51, no. 9. pp. 1267–1272 (in Russian). 6. Bugaev A. S., Glinskij I. A., Pushkarev S. S., Lavruhin D. V., YAchmenev A. Eh., Habibullin R. A., Ponomarev D. S. Razrabotka materialov i fotoprovodyashchih antenn na ih osnove dlya generacii i detektirovaniya impul'snogo i nepreryvnogo teragercovogo (THz) izlucheniya, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 5, pp. 294–302 (in Russian).

7. Catrysse P. B., Veronis G., Shin H., Shen J. T., Fan S. Guided modes supported by plasmonic films with a periodic arrangement of subwavelength slits, *Applied Physics Letters*, 2006, vol. 88, pp. 031101 (4 p.)

8. **Hseieh B.-Y., Jarrahi M.** Analysis of periodic metallic nano-slits for efficient interaction of terahertz and optical waves at nano-scale dimensions, *Journal of Applied Physics*, 2011, vol. 109, pp. 084326 (6 p.)

9. Berry C. W., Wang N., Hashemi M. R., Unlu M., Jarrahi M. Significant performance enhancement in photoconductive terahertz optoelectronics by incorporating plasmonic contact electrodes, *Nature Communications*, 2013, vol. 4, pp. 1622 (10 p.)

10. Yardimci N. T., Yang S.-H., Berry C. W., Jarrahi M. Terahertz Radiation Enhancement in Large-Area Photoconductive Sources by Using Plasmonic Nanoantennas, *Proc. Conference of Lasers and Electro-Optics*, 2015, San Jose. CA. May 10–15.

11. Yardimci N. T., Jarrahi M. 3.8 mW terahertz radiation generation over a 5 THz radiation bandwidth through large area plasmonic photoconductive antennas, *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, 2015 (2 p.)

12. Yang S.-H., Hashemi M. R., Berry C. W., Jarrahi M. 7.5 % Optical-to-Terahertz Conversion Efficiency Offered by Photoconductive Emitters with Three-Dimensional Plasmonic Contact Electrodes, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2014, vol. 4, pp. 575–581.

13. **Poverhnostnye** polyaritony. Elektromagnitnye volny na poverhnostyah i granicah razdela sred, eds. V. M. Agranovich, D. L. Mills, Moscow, Nauka, 1985, 525 p. (in Russian).

14. Bonch-Bruevich A. M., Libenson M. N., Makin V. S., Trubaev V. V. Surface electromagnetic waves in optics, *Optical Engineering*, 1992, vol. 31, no. 4, pp. 718–730.

15. Genet C., Ebbesen T. W. Light in tiny holes, *Nature*, 2007, vol. 445, no. 7123, pp. 39–46.

16. Libenson M. N. Poverhnostnye ehlektromagnitnye volny opticheskogo diapazona, *Sorosovskij obrazovat. Zhurn.*, 1996, no. 10, pp. 93–98.

17. Ordal M. A., Long L. L., Bell R. J., Bell S. E., Bell R. R., Alexander R. W., Jr., Ward C. A. Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared, *Applied Optics*, 1983, vol. 22, no. 7, pp. 1099–1120.

18. **Burford N., El-Shenawee M.** Computational modeling of plasmonic thin-film terahertz photoconductive antennas, *Journal of the Optical Society of America B*, 2016, vol. 33, no. 4, pp. 748–759.

19. Kischkat J., Peters S., Gruska B., Semtsiv M., Chashnikova M., Klinkmüller M., Fedosenko O., Machulik S., Aleksandrova A., Monastyrskyi G., Flores Y., Masselink W. T. Mid-infrared optical properties of thin films of aluminum oxide, titanium dioxide, silicon dioxide, aluminum nitride, and silicon nitride, *Applied Optics*, 2012, vol. 51, pp. 6789–6798.

20. Lepeshov S., Gorodetsky A., Krasnok A., Toropov N., Vartanyan T. A., Belov P., Alu A., Rafailov E. U. Boosting Terahertz Photoconductive Antenna Performance with Optimised Plasmonic Nanostructures, *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, no. 6624, pp. 1–7.

# Материаловедческие и технологические основы MHCT Science of materials and technological basics of MNST

УДК 661.571.1 + 539.23 + 621.3.049.771 + 681.586

DOI: 10.17587/nmst.20.659-675

**В. Ю. Васильев,** д-р хим. наук, проф., e-mail: vasilev@corp.nstu.ru, Новосибирский государственный технический университет, зам. ген. директора ООО "СибИС", г. Новосибирск

### ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК НИТРИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ И МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ. ЧАСТЬ 5. ПЛАЗМОАКТИВИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ В РЕАКТОРАХ ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

#### Поступила в редакцию 22.05.2018

В части 5 обзора проанализированы состояние и направления развития технологий получения тонких пленок нитрида кремния (ТПНК) для микроэлектронных и микросистемных приложений при плазменной активации исходных реагентов в реакторах циклического действия с последовательно-импульсным напуском исходных реагентов. Плазмоактивированное низкотемпературное атомно-слоевое осаждение (ПА-АСО) позволяет получать ТПНК при температурах ниже 500 °С из прекурсоров неорганической (силаны, хлорпроизводные силанов, амины) и органической природы для современных микро- и наноэлектронных технологий. Характеристики покрытий отвечают требованиям по составу и свойствам, в частности, ТПНК имеют низкие скорости растворения в жидкостных травителях на основе фтористоводородной кислоты. Конформность роста покрытий при ПА-АСО значительно превышает таковую для процессов получения ТПНК в проточных плазменных реакторах.

**Ключевые слова:** нитрид кремния, тонкие пленки, плазменная активация, атомно-слоевое осаждение, проточные реакторы, интегральные микросхемы, микросистемная техника

#### Введение

В работах [1, 2] проанализировано состояние технологий получения тонких пленок (ТП) нитрида кремния (НК) для применения в технологиях интегральных микросхем (ИМС) и нано- и микроэлектромеханических систем (МЭМС). В работе [1] рассмотрены процессы химического осажления из газовой фазы (ХОГФ или CVD) при температурах ( $T_d$ ) 650...850 °C в реакторах низкого давления проточного типа (РНД или Low Pressure Chemical Vapor Deposition, LPCVD) с термической активацией химических реакций аммонолиза (реакции с аммиаком, NH<sub>3</sub>) исходных кремнийсодержащих peareнтов (SiH<sub>4</sub>, SiCl<sub>4</sub> и SiH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>). В работе [2] проанализированы технологии получения ТПНК в реакторах циклического действия с последовательно-импульсным напуском исходных химических реагентов (называемых "прекурсорами", "предшественниками") в течение импульсов определенной

длительности *t*. В режиме атомно-слоевого осаждения (ACO) при температурах 300...650 °C скорость наращивания *W* составляла менее монослоя за один цикл осаждения. Оба рассмотренных метода позволяют получать ТПНК, близкие по составу к стехиометричным  $Si_3N_4$  (С-ТПНК), что отвечает соотношению Si/N = 0,75.

В частях 3 и 4 обзора [3, 4] проведен анализ состояния и направлений развития технологий получения низкотемпературных (<400 °C) ТП в проточных реакторах с плазменной активацией. Плазмохимическое осаждение (ПХО) позволяет достигать высоких скоростей наращивания [3], однако при низкой температуре формируются нестехиометричные материалы, обозначенные автором "кремний-азот-водородсодержащие тонкие пленки" (КАВ-ТП). Основным нежелательным для технологии компонентом КАВ-ТП является водород с суммарной концентрацией до 40 ат. %, который ухудшает такие технологически важные свойства пленок, как плотность, скорость растворения и т.д. Использование при ПХО так называемой плазмы высокой плотности (ПВП) обеспечивает в разы меньший и приемлемо низкий для технологии уровень содержания водорода, существенно большие плотности пленок и меньшие скорости растворения [4].

Однако неустранимой проблемой ПХО, в том числе с ПВП, является неприемлемо низкая конформность низкотемпературных плазмоактивированных покрытий (<50 %) в сравнении с таковой для высокотемпературных С-ТПНК, полученных при термически активированных ХОГФ (около 100 %) [5]. Под конформностью в простейшем и наиболее принятом случае подразумевается отношение (%) толщины покрытия на боковой поверхности ступеньки рельефа к таковой на плоской верхней поверхности. Для улучшения конформности осаждения и формирования заполненных материалом зазоров в рельефе сложных структур приборов используют методы и аппаратуру ПХО с ПВП, сочетающие процессы осаждения ТП и ее одновременного травления (распыления) в процессе роста. Кроме того, недостатком процессов ПХО с ПВП является нежелательно сильное воздействие плазмы на приборы.

#### Постановка задач обзора

Для решения обозначенных выше проблем в ряде относительно недавних по времени публикаций, например в работах [6-9], предложено использовать низкотемпературный метод АСО с "прямой" или "удаленной" плазменной активацией одного из реагентов (далее — ПА-АСО). Реакторы с ПА-АСО являются реакторами циклического действия, в которых импульсный напуск реагентов происходит согласно общей идеологии АСО; при этом один из реагентов (для случая ТПНК это либо аммиак, либо азот) подается в реактор активированным. Включение плазменного разряда возможно или сразу в начале цикла, или спустя некоторое время после начала напуска реагента; при этом активированный реагент может подаваться первым по очереди в цикле осаждения, как показано в примере на рис. 1.

Тематика ACO является очень популярной в последнее время в связи с востребованностью метода для решения все возрастающих по сложности задач технологии создания ТП. В настоящей работе проведен анализ публикаций по тематике получения активированного ACO ТПНК в реакторах циклического действия при низкой температуре с использованием исходных веществ различной природы. Особенность публикационной активности



Рис. 1. Пример типичной временной (*t*) диаграммы цикла плазмоактивированного ACO с использованием только продувки инертным газом: *1* — импульс азотсодержащего реагента; *2* — активация азотсодержащего реагента плазменным возбуждением (заштриховано); *3* — импульс продувочного газа; *4* — импульс прекурсора (предшественник). Примечание: начало этапов *1* и *2* может не совпадать во времени

Fig. 1. An example of typical (time t) diagram of the cycle of the plasmaactivated ALD process with an inert gas purge: 1 - pulse of the nitrogencontaining reactant, 2 - activation of the nitrogen-containing reactant by plasma excitation (shaded), 3 - pulse of the purge gas, 4 - pulseof the precursor injection. Note: the beginnings of the 1st and the 2d stages may not coincide

для случая ACO ТПНК состоит в том, что термически активированное (фактически — высокотемпературное) ACO ТПНК исследовалось в основном в первом десятилетии [2], а плазмоактивированное ACO — во втором десятилетии 2000-х годов. В последние годы издано несколько обзорных публикаций по активированным ACO ТПНК [10, 11]. Несмотря на наличие и использование промышленного оборудования для ПА-ACO, этот метод для получения ТПНК, по-видимому, еще нельзя отнести к зрелым технологиям в сравнении с получением ТПНК в проточных РНД [1] или при ПХО [3].

Целью работы является анализ и обобщение экспериментальных результатов по возможностям и направлениям исследований, определение возможностей метода ПА-АСО, рассмотрение особенностей его аппаратурной реализации и основных результатов исследований этого метода в сравнении с ТПНК, охарактеризованных в работах [1—4].

# Краткий обзор основных типов реакторов для плазмоактивированного АСО

Схемы реакторов для ПА-АСО в целом близки к таковым для плазменных реакторов, приведенным в работах [3, 4], и показаны на рис. 2, a-d, а их подробное описание и примеры промышленных реакторов могут быть найдены в ссылках [7, 8, 12]. Как правило, такие реакторы являются реакторами

индивидуального типа (на одну подложку). Первую конструкцию реактора (рис. 2, *a*) характеризуют типом реактора с плазмой прямого действия, ППД (*direct plasma*), что подразумевает плазменное химическое осаждение из паровой фазы (PECVD) непосредственно в области подложки. В этом случае емкостно-связанная плазма генерируется с частотой обычно 13,56 МГц между двумя парал-



Рис. 2. Упрощенные схемы основных типов реакторов для ПА-АСО: *a* — прямого действия плазмы; *b* — прямого действия с дополнительной сеткой; *c* — с удаленной плазмой; *d* — микроволновой с усилением радикалами; *e* — объемный реактор. Обозначения: *I* — ввод прекурсоров; *2* — ввод плазмообразующего газа; *3* — откачка; *4* — электрод, совмещенный с газораспределительным устройством; *5* — сетка; *6* — диэлектрическая труба с катушкой; *7* — микроволновой резонатор; *8* — устройство ВЧ возбуждения плазмы аммиака, подаваемого в зазор между подложками

Fig. 2. Simplified designs of the plasma-activated PA-ALD reactors: a - direct plasma; b - direct plasma with an additional grid; c - with a remote plasma; d - microwave radical-assisted; d - batch reactor. Definitions: 1 - injection of the precursors; 2 - injection of plasma-activated nitrogen-containing gas; 3 - pumping-out of the reaction by-products; 4 - electrode combined with the gas mixture showerhead; 5 - grid; 6 - dielectric tube with a coil; <math>7 - microwave resonator; 8 - high-frequency device for excitation of ammonia plasma introduced into the gap between the wafers

лельными электродами в так называемом диодном реакторе. Газы вводят в реактор либо через головку душевого распределительного устройства (*showerhead*), либо сбоку в зазор между электродами. Рабочее давление составляет обычно сотни паскалей, но может быть и на порядок меньше. При размещении в области плазмы дополнительной сетки (рис. 2, b) получается "триодная конструкция", позволяющая заключить плазму между верхним электродом и сеткой так, что поверхность осаждения пленки не контактирует с активной плазмой. Это несколько снижает плотность радикалов и ионных потоков к поверхности подложки.

Третью распространенную конфигурацию реактора ПА-АСО, приведенную на рис. 2, *b*, называют реактором ACO с удаленной плазмой, УП (remote plasma). При этом в отличие от реакторов первого типа, для которых концентрации активных частиц могут снижаться до нуля в направлении к поверхности подложки, здесь плазма присутствует относительно недалеко от поверхности подложки, и, таким образом, поток радикалов к подложке намного выше, чем для предыдущего типа реактора. В таких системах формирование плазмы может быть по типу реакторов с индуктивно-связанной плазмой (inductive coupled plasma, ICP, reactors), с СВЧ плазмой на основе электронно-циклотронного резонанса ЭЦР (electron-cyclotron plasma, ECR), с микроволновой плазмой (microwave plasma rectors). Важно отметить, что параметры плазмы и подложки в таких реакторах могут изменяться независимо, расширяя возможности варьирования характеристиками процессов ПА-АСО. Уровень рабочего давления *P*<sub>d</sub> в таких реакторах составляет порядка десятков-сотен паскалей.

В конструкции реактора ПА-АСО, приведенного на рис. 2, *d*, микроволновой источник плазмы соединен с реактором для ХОГФ с обычной термической активацией подложки. Этот тип плазменной активации АСО называют "усиленный радикалами" (*"radical-enhanced"*). Подобные системы чаще всего используют как встроенные в установки ХОГФ/ПХО/ПХО с ПВП для очистки стенок реакторов после осаждения путем плазменного травления.

Преимуществами ПА-АСО являются [7] расширение экспериментальных условий получения материалов с заданными свойствами, в том числе за счет расширения возможностей выбора прекурсоров неорганической и органической природы, повышение скорости осаждения при пониженных температурах (перспективными считаются менее 500 °C), улучшение свойств покрытий и т.д. К недостаткам необходимо отнести проблемы с конформностью покрытий пленками при ПА-АСО на развитом рельефе ИМС.

# Получение ТПНК с использованием неорганических прекурсоров

Исследованные прекурсоры неорганической природы включают в себя: моносилан SiH<sub>4</sub> [13, 14] и его производное неопентасилан (SiH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>Si [15]; трисилиламин (SiH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>N [15—19] и его производные [20]; хлорсодержащие силаны [21—29]. Краткие численные данные из опубликованных исследований сведены в таблицу.

**ПА-АСО из силанов.** ПА-АСО из моносилана проводилось на предварительно обработанную плазмой азота поверхность кремния, на которой, по мнению авторов, формировалась терминированная азотом поверхность — монослой азота с активными связями. Насыщение по активированному азоту имело место при импульсе длительностью более 60 с. При напуске SiH<sub>4</sub> происходит его присоединение к азоту с образованием Si—N и N—H связей. При следующем цикле напуска плазмоактивированного азота происходит удаление связей N—Н и их замещение на связи Si—N. Получаемые пленки обогащены кремнием, и при этом обнаружили механические напряжения сжатия — 810 МПа, плотность 2,5 г/см<sup>3</sup> и показатель преломления n = 1,75.

Для ПА-АСО из неопентасилана [15] отметим довольно большую длительность импульсов плазмоактивированного азота (см. таблицу), причем даже при длительности 30 с не достигается насыщение скорости осаждения (при этом показатель преломления снижается с 2,14 до 2,07). Пленки обнаруживали близкий к стехиометрии состав, малые концентрации углерода и кислорода (<1 и <3 ат. % соответственно). На концентрацию водорода влияла мощность плазмы: для 275 °С и мощностей плазмы 250 и 750 Вт концентрации водорода (ат. %) и плотности пленок (г/см<sup>3</sup>) составляли 11 и 2,21, 23,5 и 1,86 соответственно. Для вытравленных в кремнии структур шириной 0,25...2,0 мкм и глубиной 5,45...11,8 мкм установлено, что длительность импульса азота и мощность

Результаты исследований роста ТПНК в циклических процессах с участием неорганических прекурсоров Results of Investigation of SNTF in cycle type of reactors with the use of inorganic precursors

Литература <i>Ref. No</i>	Реагенты <i>Reactants</i>	Тип реактора <i>Reactor type</i>	$T_d$ , °C $T_d$ , °C	Р <sub>d</sub> , Па Р <sub>d,</sub> Ра	t, c t, s	W, нм/цикл W, nm/cycle	Si/N	
[13, 14]	SiH <sub>4</sub> N <sub>2</sub>	ППД Direct plasma	250400	130520	0,55 190	0,0250,2	1,2	
[15]	(SiH <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> Si N <sub>2</sub>	ППД Direct plasma	250300	25 75	1 230	0,14	0,88	
[15]	(SiH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N N <sub>2</sub>	ППД Direct plasma	250300	25 75	1 230	0,12	l	
[16, 17]	(SiH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N N <sub>2</sub> /H <sub>2</sub>	ППД Direct plasma	300400	520	_	0,140,21	0,89	
[18, 19]	(SiH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N NH <sub>3</sub>	УП с ИСП Remote ICP	50400	40	0,2 5	0,06	0,75	
[21, 22]	SiH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> NH <sub>3</sub>	УП микроволн. Remote microwave	200400	8 24	90 20	0,09	1	
[23]	SiH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> NH <sub>3</sub> , N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub>	УП с ИСП Remote ICP	350	_	_	0,024	0,81	
[24]	SiH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> NH <sub>3</sub>	Объемный с УП <i>RPBR</i>	350400	_	_	0,1	_	
[25]	SiH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> NH <sub>3</sub>	Объемный с УП <i>RPBR</i>	350500	_	_	_	_	
[26,27]	SiH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> NH <sub>3</sub>	Объемный с УП <i>RPBR</i>	400600	_	_	_		
[28]	Si <sub>2</sub> Cl <sub>6</sub> NH <sub>3</sub>	ППД Direct plasma	350450	~9	30 35	0,12	0,58	
[29]	Si <sub>2</sub> Cl <sub>6</sub> NH <sub>3</sub> , N <sub>2</sub>	ППД Direct plasma	300	_	_	0,50,11	_	

662 -

плазменного разряда не влияли на конформность осаждения. При этом в целом конформность можно считать неудовлетворительной, поскольку, например, для весьма простой структуры с шириной 0,35 мкм на глубине всего 1,3 мкм (в пересчете на аспектное отношение это составляет всего 3,7) конформность пленки составляла всего около 31 %.

ПА-АСО из аминов. В серии работ [15-20] авторы четырех различных групп исследователей изучали возможность получения ТПНК с участием аминов и прежде всего трисилиламина (SiH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>N, в состав которых входит атом азота, напрямую связанный с атомами кремния. По данным работ [15-17] плотность ТПНК составляла около 2,8 г/см<sup>3</sup>, скорости растворения в жидкостных травителях были в несколько раз меньше, чем таковые для обычных КАВ-ТП, полученных при ПХО. Наиболее интересными представляются попытки охарактеризовать конформность осаждения ТПНК на транзисторных структурах для использования пленки в качестве спейсера. Из приведенных данных видно, что, несмотря на весьма простые по форме транзисторные структуры, их сближение на шаг от 240 до 120 нм приводило к ухудшению конформности ПА-АСО ТПНК на 20...30 %. Это, тем не менее, было существенно лучше в сравнении с обычным ПХО.

Авторы работ [18, 19] установили оптимальное окно процесса с примерно постоянной скоростью в интервале температуры 250...350 °С (см. таблицу). По составу ТПНК были близки к стехиометричным, хотя и имели показатель преломления 1,75...1,8 и содержали 13,4...8,1 ат. % водорода соответственно. Установлено, что изменение мощности втрое (от 100 до 300 Вт) дало возможность примерно в 3 раза понизить скорость растворения ТПНК.

В работе [20] исследованы ТПНК, полученные из производных трисилиламина (путем замены в исходном прекурсоре групп SiH<sub>3</sub> группами диметиламинометилсилил или триметилсилил). Из трех синтезированных прекурсоров в качестве перспективного для ПА-АСО ТПНК был выбран реагент с брутто-формулой (С<sub>9</sub>H<sub>29</sub>N<sub>3</sub>Si<sub>3</sub>): бис(диметиламинометилсилил)триметилсилиламин. Для осаждения использован реактор прямого действия, температура осаждения составляла 250...400 °С, давление около 80 Па, длительность импульсов прекурсора 1...9 с, а плазмоактивированного азота — 4...15 с. В этих режимах ТПНК имели отношение Si/N около единицы и n = 1,97. Концентрация углерода при увеличении мощности плазмы в пределах 100...200 Вт и выше возрастала в пределах 0...5 ат. %. При этом также возрастала концентрация кислорода в пределах 7...11 ат. %, что авторы объяснили окислением обогащенных кремнием ТПНК на воздухе после процесса. Для структуры шириной 0,071 мкм и глубиной 0,375 мкм со слегка наклонными стенками конформность на половине глубины оценена на уровне 73 %. В обзоре [10] также можно найти краткие табличные сведения о попытках использования для ПА-АСО иных органических аминосиланов в прямой или удаленной плазме азота и аммиака: бис-диэтиламиносилан (bis(diethylamino)silane), трис-диметиламиносилан (tris(dimethylamino)silane) и др. Особенностями процессов ПА-АСО из этих прекурсоров были неприемлемо низкие скорости наращивания (сотые доли нанометра за цикл), а также значение показателя преломления n = 1, 7...1, 8.

ПА-АСО из хлорсиланов. Хронологически первым был исследован промышленный реагент дихлорсилан SiH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>. К сожалению, приведенные в литературе данные о процессах роста при ПА-АСО очень ограниченны. В работах [21, 22] авторами приведены результаты исследований пленок, полученных в экспериментальных реакторах индивидуального типа с удаленным источником плазмы путем нитридизации плазмой аммиака тонкой пленки кремния, выращенной при термоактивированном пиролизе дихлорсилана при 750 °С. При этом подача активированного аммиака была первой в цикле, затем следовала импульсная продувка реактора смесью N<sub>2</sub>—H<sub>2</sub> и далее подавался импульс дихлорсилана. Результаты исследований приведены в таблице, а более подробно рассмотрены в работе [2], где проведено прямое сравнение с результатами роста ТПНК при термической активации процесса ACO с участием SiH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>. Здесь отметим, что получаемые ТПНК имели n = 1, 6...1, 85, [О] ~ 2...7 ат. % (объяснено возможным распылением кварцевых стенок генератора плазмы), [H] ~ 13 ат. %, [Cl] ~ 0,5 ат. %. Авторы работы [23] провели сравнение ТПНК, полученных при ПА-АСО из SiH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> и кремнийорганических соединений с участием плазмоактивированных аммиака, азота, водорода. Некоторые данные по процессу с дихлорсиланом приведены в таблице, более подробно результаты рассматриваются ниже.

В серии работ [24—27] исследования проведены в промышленных объемных реакторах, конструктивно аналогичных РНД (LPCVD) (см. рис. 2, e), но работающих циклическим образом. Такие реакторы дополнительно оснащены устройствами удаленной высокочастотной плазменной активации подаваемого в реактор аммиака (обозначены "Объемный с УП" или Remote Plasma Batch Reactor, RPBR). Осаждение проводилось циклами из SiH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> при температуре <500 °С. Фактических данных о процессе роста пленок очень мало, численные данные о процессах приведены в таблице. Авторы работы [25] в интервале температур

350...500 °С обнаружили линейное изменение плотности пленок в интервале 2,5...2,75 г/см<sup>3</sup> и куполообразное изменение механических напряжений сжатия с максимумом ~ 13 МПа при температуре около 450 °C. В работах [26, 27] оценивали возможность использования ПА-АСО ТПНК в качестве материала спейсера для технологии ИМС с проектно-технологическими нормами 28...32 нм. Активированный аммиак также подавался первым в цикле осаждения. Показано, что скорости растворения в разбавленной фтористоводородной кислоте (Diluted HF, DHF) экспоненциально снижаются с ростом температуры осаждения в интервале 400...600 °С. Исследована также конформность осаждения на транзисторной структуре, которая составляла 100 % для одинарного и двойного шагов (*pitch*), в то время как при использовании ПХО КАВ-ТП конформности составляли 60 и 87 % соответственно. Отметим интересный результат применения вместо дихлорсилана прекурсора монохлорсилана SiH<sub>3</sub>Cl [27]. Оказалось, что ТПНК из этого реагента имеет примерно вдвое меньшие скорости растворения в DHF, что свидетельствует в пользу их большей плотности.

Исследования [28, 29] проведены с использованием олигомера Si<sub>2</sub>Cl<sub>6</sub> и плазмоактивированного аммиака. В работе [28] доза Si<sub>2</sub>Cl<sub>6</sub>, подаваемого в реактор первым, составляла 8 · 10<sup>5</sup> L (L — единица измерения лэнгмюр, равная  $1 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст. · с, т. е. произведение давления  $P_d$  на длительность импульса pearentra t). Для температуры осаждения 400 °С в КАВ-ТП обнаружено 23 ат. % водорода, в основном в виде N—Н групп, n = 1,9, плотность 2,5 г/см<sup>3</sup>. Присутствие хлора оценено на уровне менее 0,1 ат. %. Обогащение пленки по азоту авторы объяснили присутствием в ней N-Н групп. Конформность роста ТПНК на структуре с наклонными стенками и зазором в нижней части около 0,1 мкм, высотой 0,5 мкм была практически идеальной. Авторы [29] использовали проточный реактор с холодными стенками (traveling-wave reactor, использованный в самых первых исследованиях АСО [30]), дополнительно оснащенный плазменным источником. Кроме прекурсора Si<sub>2</sub>Cl<sub>6</sub>, доза которого варьировалась в пределах  $1 \cdot 10^6 \dots 5 \cdot 10^7$  L, использовали аммиак с фиксированной дозой  $1 \cdot 10^9$  L, а также плазму азота перед напуском прекурсора. Таким образом, цикл осаждения состоял не из обычных двух, а из трех этапов: прекурсор/аммиак/активированный азот, причем после каждого из этапов была продувка аргоном. Применение плазмы азота (100 Вт, 200 Па, 50 с) дало возможность примерно вдвое увеличить скорость осаждения — от 0,05 до 0,11 нм/цикл — и таким образом снизить дозу прекурсора почти на порядок.

# Осаждение с использованием органических прекурсоров

Совокупность публикаций [23, 31—35] представляет на настоящий момент времени результаты наиболее объемных исследований возможности получения ТПНК с участием ПА-АСО из бистрет-бутиламиносилана (NH<sup>t</sup>C<sub>4</sub>H<sub>9</sub>)<sub>2</sub>SiH<sub>2</sub> (зарубежный термин и аббревиатура *bis(tertiary-butylamino)silane*, BTBAS). Прекурсор представляет собой бесцветную жидкость плотностью 0,82 г/см<sup>3</sup> при 20 °С с температурой кипения 167 °С при нормальных условиях. Для ПА-АСО используется удаленная плазма аммиака, азота и водорода в реакторе с ИСП мощностью 600 Вт и частотой возбуждения 13,56 МГц. Наиболее интересными результатами публикаций [23, 31—35] можно считать следующие.

1. В работе [23] проведено сравнительное исследование корреляции плотности ТПНК и скоростей их растворения в разбавленной водой 100:1 фтористоводородной кислоте. Пленки получали в реакторе с ИСП, аналогичном описанному выше, при мощности 300...400 Вт и температуре осаждения 350 °C. В качестве исходного органического прекурсора использован трис-триметиламиносилан [(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>N]<sub>3</sub>SiH, для сравнения исследовали неорганические прекурсоры SiH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> и трисилиламин (SiH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>N. В качестве второго азотсодержащего реагента использовали плазмоактивированные смеси азота, амимиака и водорода. В целом все исследованные варианты прекурсоров описаны линейной зависимостью в интервале скорости растворения 0,2...9,0 нм/мин и плотности ТПНК 2,9...2,3 г/см<sup>3</sup>. В составе всех типов ТПНК не было обнаружено углерода, однако в аномально высоких концентрациях присутствовал кислород — от 7 до 22 ат. %. Хотя источник кислорода авторами не объяснен, можно предположить, что окисление нестехиометричных ТП может происходить на воздухе уже после извлечения образцов из реактора. На такую возможность, в частности, указывали авторы работ [20, 36].

2. Ростовые особенности исследованы в работах [31—34]. Отмечено, что в случае использования плазмы водородсодержащих соединений (NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>) происходило блокирование активных мест поверхности (терминирование), вызывающее снижение скорости осаждения. При использовании азотной плазмы достигались максимальные значения скорости осаждения.

3. Авторы работы [32] отметили влияние параметра "время пребывания" (*residence time*,  $\tau$ , c) в камере плазменного потока на скорость осаждения и свойства ТПНК и назвали обнаруженный эффект повторным осаждением (*redeposition*). Величину  $\tau$  определяли как отношение известного объема реактора к известному объемному расходу плазмоактивированного газа через реактор. Эффект повторного осаждения наблюдали при  $\tau = 0,1...0,9$  с. Суть эффекта, по мнению авторов, заключалась в том, что при больших  $\tau$ , т.е. при медленном движении плазмоактивированного газа в реакторе, продукты реакции могли попадать обратно в плазму, далее распадаясь и повторно осаждаясь в растущую пленку. В частности, при возрастании  $\tau$  в интервале 0,1...0,9 с происходили следующие изменения: показатель преломления снижался в интервале 1,95...1,72, концентрации кислорода — 2,5...5 ат. %, углерода — 0,5...1,5 ат. %, а скорости жидкостного растворения возрастали в 4 раза.

4. С ростом температуры в интервале 100...500 °С скорость наращивания снижалась в пределах 0,09...0,015 нм/цикл при длительности цикла около 17 с; в этом же диапазоне температур характеристики ТПНК составляли: n = 1,63...1,96, соотношение Si/N = 0,37...0,66, концентрация углерода снижалась с 25 до 2 ат. %, а концентрация водорода — с 11 до 5 ат. %. Увеличение длительности импульса плазмы азота в интервале 1...15 с приводило к некоторому снижению скорости наращивания в приведенных выше пределах, изменению концентрации углерода в интервале 18...8 ат. % и возрастанию соотношения Si/N в интервале 0,4...0,62. При этом в ТП независимо от условий роста обнаружен кислород с концентрацией около 5 ат. %, источником которого признаны кварцевые стенки реактора. Качество ТПНК определяется температурой осаждения: выше 500 °С пленки близки к стехиометрическим по составу и основным свойствам. Встраивание углерода в ТПНК описано в виде формирования связей Si-C и C-N [34]. Отметим, что это соответствует заключению авторов работы [37] о насыщенных углеродом ТПНК, полученных при термоактивированном аммонолизе этого же реагента. Действительно, данный прекурсор (NH<sup>t</sup>C<sub>4</sub>H<sub>9</sub>)<sub>2</sub>SiH<sub>2</sub> изучали примерно десятилетие авторы ранее цитированных работ в целях получения пленок ТПНК в РНД по реакции с аммиаком при температурах ниже 600 °С. В частности, авторы показали, что в сравнении с традиционно используемым дихлорсиланом применение органического прекурсора при приемлемом уровне скоростей осаждения 0,4...3,0 нм/мин и неоднородности толщины покрытия на подложках 200 мм очевидно приводили к появлению в пленках углерода (около 7 ат. %), встроенного в матрицу материала вместо азота, и к пятикратно большему содержанию водорода (до 15 ат. %).

#### Сравнение процессов АСО с другими процессами получения ТПНК

Развитие процессов получения тонких пленок идет неотрывно от развития приборов микро- и наноэлектроники и МЭМС, в которых используют или планируют к использованию в том числе и материалы под общим названием ТПНК. Это, например, объясняет, что процессы термоактивированного АСО (далее — ТА-АСО) в основном исследовали на рубеже 2000-х годов, в то время как процессы ПА-АСО интенсивно начали изучать на рубеже 2010-х годов, когда проектно-технологические нормы ИМС достигли 45 нм и менее. Совершенствование технологии в целом требовало меньшей толщины тонких пленок всех типов. При этом ключевым параметром любого вида АСО является конфомность осаждения.

Автор выбрал два направления сравнения информации по ПА-АСО ТПНК: с процессами ТА-АСО [2] и с процессами низкотемпературного плазмоактивированного осаждения в проточных реакторах (ПХО) [3, 4]. Эталоном для сравнения являются стехиометрические ТПНК (С-ТПНК), получаемые промышленным методом путем аммонолиза дихлорсилана в реакторах пониженного давления.

*Сравнение основных характеристик ТА-АСО и ПА-АСО.* В обоих случаях по характеризации процессов приведено очень мало экспериментальных данных, температурные зависимости оценены всего лишь в нескольких работах, а опубликованные результаты, как правило, представлены отдельными группами, развивающими свое направление, и не подтверждены другими авторами, как, например, это было для процессов получения ТПНК в РНД в 1970...1990-х годах.

В работе [2] по совокупности около 10 публикаций было установлено, что температуру ТА-АСО можно снизить на 200 °С и более относительно промышленного процесса аммонолиза дихлорсилана (~700 °C). При этом автор хотел бы отметить недавно опубликованную патентную заявку [38] компании Applied Materials, Inc., в которой TA-ACO с участием SiCl<sub>4</sub> и азотсодержащих реагентов заявлялось в диапазоне 600...725 °C, т.е. всего на 50...100 °С ниже объекта сравнения. При этом уровень концентрации водорода составлял 10 ат. % для 600 °С и снижался до 6 ат. % при 700 °С. К сожалению, в публикациях, рассмотренных в работах [2] и [38], не было приведено конкретных результатов об улучшении конформности для процессов ТА-АСО в сравнении с процессами получения С-ТПНК в проточных реакторах низкого давления. Таким образом, можно достаточно непротиворечиво считать, что известные процессы с термической активацией [1, 2] довольно близки по характеристикам процессов, по составу и свойствам.

Однако приведенные в таблице работы [2] данные по процессам ACO указали на аномально большие дозы прекурсоров, использованные для получения приемлемой скорости осаждения (в [38] таких данных нет вообще). Значения приведенных доз реагентов дали возможность автору провести количественную оценку потенциальной эффективности процессов TA-ACO для производства.

Для оценки порядков величины и достаточности доз реагентов при ПА-АСО в сравнении с ТА-АСО автором приняты следующие исходные данные: плотность стехиометрического  $Si_3N_4 - 3,17$  г/см<sup>3</sup> (по факту отличается в меньшую сторону), молекулярная масса  $Si_3N_4 - 140$ , пластина — диаметр 200 мм (площадь — 314 см<sup>2</sup>), усредненная скорость наращивания 0,2 нм/цикл (0,2 · 10<sup>-7</sup> см/цикл). По этим данным оценка объема ТПНК, образовавшегося на подложке за один цикл процесса, составляет  $\sim 7 \cdot 10^{-8}$  см<sup>3</sup>/цикл, или  $2 \cdot 10^{-5}$  г, или  $\sim 9 \cdot 10^{16}$  молекул/цикл. С учетом реальных отклонений от принятых значений в сторону уменьшения скорости осаждения вплоть до одного порядка, реального отклонения плотности ТП в меньшую сторону и т.д., можно принять, что значение ~10<sup>17</sup> молекул/цикл для образующегося за цикл ТПНК вполне отвечает опубликованным экспериментальным данным.

Для оценки характеристики импульса прекурсора в соответствии с известным уравнением Менделеева — Клапейрона примем объем индивидуального реактора ~5 дм<sup>3</sup>, газовую постоянную 62,3 мм рт. ст.  $\cdot$  дм<sup>3</sup> · моль<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>, температуру осаждения 400 °С (700 К), давление в реакторе 100 мм рт. ст. (по данным [2] использовали до 500 мм рт. ст.). Оценка числа молекул в импульсе для указанных величин дает ~7 · 10<sup>21</sup> молекул. Для дозы прекурсора в один лэнгмюр (L) оценка числа молекул составляет ~ $7 \cdot 10^{13}$  молекул (то есть в рассчитанном выше импульсе доза будет ~ $10^8$  L). Исходя из приведенных выше оценок, для формирования одного монослоя ТПНК необходима доза прекурсора на уровне  $\sim 10^4$  L, что примерно на 4-5 порядков меньше приведенных в публикациях экспериментальных доз прекурсоров при ТА-АСО. Проведенная оценка позволяет заключить, что эффективность использования прекурсоров при ТА-АСО (доля прекурсора, перешедшего в П, от количества прекурсора, подаваемого в реактор) составляет сотые доли процента, что безусловно, неприемлемо для производства. Для сравнения: согласно данным автора эффективность промышленного процесса аммонолиза дихлорсилана в РНД составляет около 5 % [39], а для процессов ПХО — на порядок выше. Необходимо отметить, что для ПА-АСО необходимые дозы прекурсоров оказываются на несколько порядков меньше, что свидетельствует о большей эффективности таких процессов.

Сравнение основных характеристик ПХО и ПА-АСО. Поскольку считается, что процессы ПА-АСО дают возможность снизить температуру "окна АСО" на несколько сотен градусов, то этот температурный интервал попадает в интервал температур, характерный для процессов ПХО и ПХО с ПВП. Принципиальным отличием ПА-АСО от плазмоактивированных процессов в проточных реакторах является очень низкая, на порядки меньше, скорость осаждения в сравнимых температурных интервалах. Однако общий тренд к уменьшению толщин пленок для современных технологий до уровня нескольких десятков нанометров определенно сглаживает этот недостаток. В то же время конформность некоторых процессов ПА-АСО в сравнении с ПХО существенно лучше, что подтверждено авторами работ [16, 17, 20, 26-28]. Кроме того, по составу такие пленки приближаются к стехиометричным.

Процессы ПА-АСО в настоящее время, по-видимому, далеки от признания их зрелыми и находятся в развитии. Автор хотел бы отметить следующие основные тенденции такого развития. Первая — поисковая активность в плане прекурсоров, не содержащих хлора и углерода. Вторая — использование реакторов "прямого действия", т. е. с емкостным возбуждением плазмы, - наиболее простых и фактически идентичных промышленным реакторам ПХО. Здесь необходимо отметить, что примерный уровень необходимых доз при ПА-АСО реализуется при относительно длительных временах импульсов реагентов, достигающих десятков секунд (см. таблицу), что вполне сопоставимо с временами процессов ПХО. Можно предположить, что хорошо известные (и более дешевые) плазменные реакторы прямого действия могут оказаться хорошим вариантом реализации процессов ПА-АСО применительно к низкотемпературным ТПНК удовлетворительного качества.

В качестве актуальной проблемы для повышения производительности процессов ПА-АСО автор отметил бы поиск путей обработки поверхности для повышения скорости осаждения. Такие работы, в частности, позволяют предположить использование активированного азота [29] или водорода [40]. Однако обработка внутренних поверхностей сложных рельефов приборов, очевидно, потребует использования интенсивных потоков активированных частиц, т. е. увеличения возбуждающей энергии, способной привести к неприемлемым нарушениям в приборах.

#### Заключение

Плазмоактивированное низкотемпературное АСО позволяет получать ТПНК при температурах ниже 500 °С из прекурсоров неорганической природы (силаны, хлорпроизводные силанов, амины). Характеристики покрытий отвечают требованиям производства ИМС, обеспечивая приемлемые скорости наращивания и низкие скорости растворения в жидкостных травителях на основе фтористоводородной кислоты. Конформность роста покрытий при ПА-АСО значительно превышает таковую для ПХО. Автор хотел бы отметить следующие тенденции развития процессов ПА-АСО. Первая тенденция — поисковая активность в плане прекурсоров: перспективными являются прекурсоры органический природы, позволяющие получать ТПНК с характеристиками, приемлемыми для современных микро- и наноэлектронных технологий. Вместе с тем необходимо отметить, что, несмотря на многолетние и многократные попытки внедрения органических прекурсоров в производство ТП, их скорее можно считать неудавшимися в случаях, когда имеются приемлемые прекурсоры неорганической природы. Вторая тенденция — использование реакторов прямого действия — наиболее простых и, фактически, идентичных промышленным классическим реакторам ПХО. Третья тенденция поиск путей обработки поверхности для повышения скорости осаждения.

#### Список литературы

1. Васильев В. Ю. Технологии получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Часть 1. Термически активированные процессы в проточных реакторах // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20, № 5. С. 287—296.

2. Васильев В. Ю. Технологии получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Часть 2. Термически активированные процессы в реакторах циклического действия // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20, № 6. С. 329—339.

3. Васильев В. Ю. Технологии получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Часть 3. Плазмоактивированные процессы в проточных реакторах // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20, № 9. С. 542—554.

4. Васильев В. Ю. Технологии получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Часть 4. Процессы в проточных реакторах с активацией плазмой высокой плотности // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20, № 10. С. 585—595.

5. Vassiliev V. Y., Sudijono J. L., Cuthbertson A. Trends in Void-Free Pre-Metal CVD Dielectrics // Solid State Technol. 2001. Vol. 44. N. 3. P. 129–136.

6. George S. M. Atomic Layer Deposition: An Overview // Chem. Rev. 2010. Vol. 110, N. 1. P. 111–131.

7. Profijt H. B., Potts S. E., van de Sanden M. C.M. et al. Plasma-Assisted Atomic Layer Deposition: Basics, Opportunities, and Challenges // J. Vac. Sci. Technol. A. 2011. Vol. 29, N. 5. P. 050801–050826.

8. **Kessels E., Profijt H., Potts S.** et al. Plasma Atomic Layer Deposition // In Atomic Layer Deposition of Nanostructures Materials (Pinna N. and Knez M. Ed.). Weinheim, Germany: Willey-VCH. Verlag. 2012. P. 131–158.

9. Potts S. E., Kessels W. M. M. Energy-enhanced atomic layer deposition for more process and precursor versatility // Co-ord. Chem. Rev. 2013. Vol. 257. P. 3254–3270.

10. Xin Meng, Byun Y.-C., Kim H. S. et al. Atomic Layer Deposition of Silicon Nitride Thin Films: A Review of Recent Progress, Challenges, and Outlooks // Materials. 2016. N. 9. Article ID 1007. 20 p.

11. **Kaloyeros A. E., Jove F. A., Goff J.** et al. Review-Silicon Nitride and Silicon Nitride-Rich Thin Film Technologies: Trends in Deposition Techniques and Related Applications // ECS J. of Solid State Sci. and Techn. 2017. Vol. 6, N. 10. P. P691—P714.

12. Heil S. B. S., Hemmen van J. L., Hodson C. J. et al. Deposition of TiN and HfO2 in a commercial 200 mm remote plasma atomic layer deposition reactor // J. Vac. Sci. Technol. A. 2007. Vol. 25, N. 5. P. 1357–1366.

13. King S. W. Plasma Enhanced Atomic Layer Deposition of SiN:H using  $N_2$  and Silane // ECS Trans. 2010. Vol. 32, N. 2. P. 365–373.

14. King S. W. Plasma enhanced atomic layer deposition of SiNx:H and SiO<sub>2</sub> // J. Vac. Sci. Technol. A. 2011. Vol. 29, N. 4. P. 041501/1-9.

15. Week S., Nowling G., Fuchigami N. et al. Plasma enhanced atomic layer deposition of silicon nitride using neopentasilane // J. Vac. Sci. Technol. A. 2016. Vol. 34, N. 1. P.01A140/1-6.

16. **Triyoso D. H., Jaschke V., Shu J.** et al. Robust PEALD SiN spacer for gate first high-k metal gate integration // Proc. 2012 Int. Conf. on ACO N 12851120 (4 p.).

17. **Triyoso D. H., K. Hempel K., S. Ohsiek S.** et al. Evaluation of Low Temperature Silicon Nitride Spacer for High-k Metal Gate Integration // ECS J. of Sol. State. Sci. Technol. 2013. Vol. 2, N. 11. P. N222–N227.

18. Jang W., Jeon H., Kang C. et al. Temperature dependence of silicon nitride deposited by remote plasma atomic layer deposition // Phys. Status Solidi A. 2014. Vol. 211, N. 9. P. 2166–2171.

19. Jang W., Jeon H., Song H. et al. The effect of plasma power on the properties of low-temperature silicon nitride deposited by RPALD for a gate spacer // Phys. Status Solidi A. 2015. Vol. 212, N. 12. P. 2785–2790.

20. **Park J.-M., Jang S. J., Yusup L.** et al. Plasma-enhanced atomic layer deposition of silicon nitride using novel silylamine precursor // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2016. Vol. 8, N. 32. P. 20865–20871.

21. Goto H., Shibahara K., Yokoyama S. Atomic layer controlled deposition of silicon nitride with selflimiting mechanism // Appl. Phys. Lett. 1996. Vol. 68, N. 23. P. 3257–3259.

22. Yokoyama S., Goto H., Miyanoto T. et al. Atomic layer controlled deposition of silicon nitride and in situ growth observation by infrared reflection absorption spectroscopy // Appl. Surf. Sci. 1997. Vol. 112. P. 75–78.

23. **Provine J., Schindler P., Kim Y.** et al. Correlation of film density and wet etch rate in hydrofluoric acid of plasma enhanced atomic layer deposited silicon nitride // AIP Advances. 2016. Vol. 6, N. 6. P. 065012–065021.

24. Ando T., Ohta Y., Ashihara H. et al. A Silicon Nitride MIM Capacitor for Analog/Mixed-Signal Integrated Circuit using Manufacturable Atomic Layer Deposition Equipment // ECS Trans. 2007. Vol. 11, N. 7. P. 55–60.

25. Nagata K., Nagasaka M., Yamaguchi T. et al. Evaluation of Stress Induced by Plasma Assisted ALD SiN Film // ECS Trans. 2013. Vol. 53, N. 3. P. 51–56.

26. Koehler F., Triyoso D. H., Hussain I. et al. Atomic Layer Deposition of SiN for spacer applications in high-end logic devices // IOP Conf. Series: Mat. Sci. and Eng. 2012. Vol. 41. Article N. 012006 (4 p.).

27. Koehler F., Triyoso D. H., Hussain I. et al. Challenges in spacer process development for leading-edge high-k metal gate technology // Phys. Status Solidi C. 2014. Vol. 11, N. 1. P. 73–76.

28. Ovanesyan R. A., Hausmann D. M., Agarwal S. Low-Temperature Conformal Atomic Layer Deposition of  $SiN_x$  Films Using  $Si_2Cl_6$  and  $NH_3$  Plasma // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2015. Vol. 7, N. 202. P. 10806–10813.

29. Yusup L., Park J.-M., Noh Y.-H. et al. Reactivity of different surface sites with silicon chlorides during atomic layer deposition of silicon nitride // RSC Adv. 2016. Vol. 6. P. 68515-68524.

30. **Suntola T.** Atomic layer epitaxy // Thin Solid Films. 1992. Vol. 216. P. 84–89.

31. Knoops H. C. M., Braeken E. M. J., de Peuter K. et al. Atomic Layer Deposition of Silicon Nitride from Bis(tertbutylamino) silane and N<sub>2</sub> Plasma // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2015. Vol. 7, N. 35. P. 19857–19862.

32. **Knoops H. C. M., de Peuter K., Kessels W. M. M.** Redeposition in plasma-assisted atomic layer deposition: Silicon nitride film quality ruled by the gas residence time // Appl. Phys. Lett. 2015. Vol. 107, N. 1. P. 014102—014106. 33. Ande C. K., Knoops H. C. M., de Peuter K. et al. Role of Surface Termination in Atomic Layer Deposition of Silicon Nitride // J. Phys. Chem. Lett. 2015. Vol. 6, N. 18. P. 3610–3614.

34. Bosch R. H. E. C., Cornelissen L. E., Knoops H. C. M. et al. Atomic Layer Deposition of Silicon Nitride from Bis(Tertiary-Butyl-Amino)Silane and  $N_2$  Plasma Studied by in situ Gas Phase and Surface Infrared Spectroscopy // Chem. Mater. 2016. Vol. 28, N. 16. P. 5864—5871.

35. Andringa A.-M., Perrotta A., de Peuter P. et al. Low-Temperature Plasma-Assisted Atomic Layer Deposition of Silicon Nitride Moisture Permeation Barrier Layers // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2015. Vol. 7, N. 40. P. 22525–22532.

36. **Park K., Yun W.-D., Choi B.-J.** et al. Growth studies and characterization of silicon nitride thin films deposited by alternating exposures to  $Si_2Cl_6$  and  $NH_3$  // Thin Solid Films. 2009. Vol. 517. P. 3971–3978.

37. **Gumpher J., Bather W., Mehta N.** et al. Characterization of Low-Temperature Silicon Nitride LPCVD from Bis(tertiarybutylamino)silane and Ammonia // J. Electrochem. Soc. 2004. V. 151, N. 5. P. G353–G359.

38. Lu H., Lei P., Kao C.-T. et al. High temperature thermal ALD silicon nitride films // Патентная заявка США. Pub. No.: US 2017/0053792, дата подачи 16.08.2016.

39. **Vasilyev V. Yu.** Thin Film Chemical Vapor Deposition in Integrated Circuit Technology: Equipment, Methodology and Thin Film Growth Experience. New York: Nova Science Publishers, Inc. 2014. 314 p.

40. Yokoyama S., Ikeda N., Kajikawa K. et al. Atomic-layer selective deposition of silicon nitride on hydrogen-terminated Si surfaces // Appl. Surf. Sci. 1998. Vol. 130–132. P. 352–356.

#### V. Yu. Vasilev, D. Sc., Professor, vasilev@corp.nstu.ru

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, Deputy Director General, SibIS LLC, Novosibirsk, 630082, Russian Federation

Corresponding author:

**Vasilev Vladislav Yu.**, D. Sc., Professor, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, Deputy Director General, LLC, Novosibirsk, 630082, Russian Federation, vasilev@corp.nstu.ru

### Silicon Nitride Thin Film Deposition for Microelectronics and Microsystem Technologies. Part 5. Plasma-Activated Processes in the Cycle-Type Reactors

Received on May 22, 2018 Accepted on June 15, 2018

The fifth part of the review contains an analysis of the present state and possible directions for development of the technologies for obtaining of the silicon nitride thin films (SNTF) intended for the integrated circuits (IC) and microelectromechanical systems (MEMS). Information concerning the low-temperature SNTF, obtained in plasma-activated atomic-layer deposition (PA-ALD) in the cycle-type reactors with sequentially pulsed reactant injection, is analyzed. PA-ALD allows us to obtain SNTF at temperatures below 500 °C using inorganic (silanes, chlorosilanes, amines) and organic precursors. The film characteristics meet the technology requirements, such as the film stoicheometry, density, low etch rates, etc. In case of PA-ALD of SNTF the conformality of growth is much better than in the processes of obtaining of SNTF in the flow plasma reactors.

**Keywords:** silicon nitride, thin films, plasma-activated reactions, cycle-type reactors, integrated circuits, microelectromechanical systems

#### For citation:

**Vasilyev Vladislav Yu.** Silicon Nitride Thin Film Deposition for Microelectronics and Microsystem Technologies. Part 5. Plasma-Activated Processes in the Cycle-Type Reactors, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 11, pp. 659–675.

DOI: 10.17587/nmst.20.659-675

In [1, 2] the present state of the technologies for obtaining of thin films (TF) of silicon nitride (SNTF) for application in the technologies of the integrated microcircuits (IC) and nano- and microelectromechanical systems (MEMS) is analyzed. Part [1] is devoted to consideration of the processes of chemical deposition from the gas phase (CVD) at  $(T_d)$  650...850 °C in the low pressure reactors of the flow type (Low Pressure Chemical Vapor Deposition, LPCVD) with a thermal activation of the chemical reactions of ammonolysis (reactions with ammonia, NH<sub>3</sub>) of the initial siliconcontaining reagents (SiH<sub>4</sub>, SiCl<sub>4</sub> and SiH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>). Part [2] contains analysis of the technologies for obtaining of SNTF in the cyclic-type reactors with sequentially pulsed injection of the initial chemical reagents (called "precursors", "predecessors") during pulses of certain duration t. In the mode of the atomic-layer deposition (ALD) at 300...650 °C the rate of growth W was less than one monolayer per one cycle of deposition. Both of the considered methods allow us to receive SNTF, close by their composition to stochiometric  $Si_3N_4$  (S-SNTF), which corresponds to the correlation Si/N = 0.75.

In parts 3 and 4 of the review [3, 4] an analysis was done of the present state and directions for development of the technologies for obtaining of low-temperature (<400 °C) TF in the flow reactors with plasma activation. Plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD) allows us to reach high rates of growth [3], however, at a low temperature the non-stoichiometric materials are formed dubbed by the author as "siliconnitrogen-hydrogen containing thin films" (SiNH-TF). The main technologically undesirable component of SiNH-TF is hydrogen with the total concentration up to 40 at. %, which worsens such technologically important properties of the films as density, rate of dissolution, etc. Use of the so-called high density plasma (HDP) during PECVD ensures a many times lower and acceptable for the technology level of the content of hydrogen, an essentially higher density of the films and lower rates of dissolution [4].

However, an ineradicable problem with PECVD, including HDP, is an unacceptably low conformality of the low-temperature plasma-activated coatings (< 50 %) in comparison with that of the high-temperature S-SNTF, received at the thermally activated CVD (about 100 %) [5]. In the elementary and most widely acceptable sense "the conformality" means correlation (%) of the thickness of a coating on the lateral surface of a step of the relief to that on a flat top surface. For improvement of the conformality of deposition and formation of the material-filled gaps in the relief of complex structures of the devices, the methods and equipment of PECVD with HDP are used, combining the processes of deposition of TF and its simultaneous etching (sputtering) in the course of the

growth. Besides, a drawback of PECVD processes with HDP is a strong undesirable influence of plasma on the devices.

#### Statement of problems of the review

For solving of the above problems, the authors of a number of relatively recent publications, for example in [6-9], suggested to use the low-temperature method of ALD with a "direct" or "remote" plasma activation of one of the reagents (hereinafter, PA-ALD). Reactors with PA-ALD are the reactors of the cyclic type, in which a pulsed injection of the reagents occurs according to the general ideology of ALD; at that, one of the reagents (in case of SNTF it is either ammonia, or nitrogen) is injected into the reactor activated. The plasma charge can be turned on either at once, in the cycle beginning, or after a while, after injection of a reagent; at that, the activated reagent can be injected first in the deposition cycle, as is shown in the example in fig. 1.

The subject of ALD is very popular in connection with a high demand for the method as a solution to the problems of increasing complexity involved in development of TF technology. In the present work an analysis is done of the publications on the subject of reception of activated ALD SNTF in the cycle-type reactors at a low temperature with the use of the initial substances of various nature. A feature of the publication activity for the case of ALD SNTF consists in the fact that the thermally activated (actually – high-temperature) ALD SNTF were mainly investigated in the first decade [2], while the plasma-activated ALD — in the second decade of 2000s. In recent years several survey publications on the activated ALD SNTF [10, 11] were published. Despite availability of the industrial equipment for the PA ALD, this method for obtaining of SNTF, apparently, still cannot be considered a mature technology in comparison with reception of SNTF in the flow LPCVD [1] or at PECVD [3].

The aim of the work is analysis and generalization of the experimental results concerning the opportunities and directions of the research, estimation of the possibilities of the method of the PA-ALD, the features of its hardware realization and the basic results of the research in comparison with SNTF presented in [1-4].

#### A brief review of the basic types of the reactors for the plasma-activated ALD

In general the designs of the reactors for the PA-ALD are close to those of the plasma reactors, presented in [3, 4] and are shown in fig. 2, a-d, and their detailed description and examples of the industrial reactors can be found in [7, 8, 12]. As a rule, such reactors

are the reactors of individual type (per one wafer). The first design of the reactor (fig. 2, a) is typical for a reactor with plasma of direct action (direct plasma), which envisages plasma chemical deposition from the vapor phase (PECVD) directly in the area of the wafer. In this case the capacitance-coupled plasma is usually generated with the frequency of 13.56 MHz between two parallel electrodes in the so-called "diode reactor". The gases are introduced into a reactor either through the showerhead, or from one side, through the gap between the electrodes. Usually, the working pressure equals to hundreds of pascals, but can also be about 10 times less. If an additional grid is placed in the area of plasma (fig. 2, b), we get a "triode design", allowing to keep plasma between the top electrode and the grid so, that the surface of deposition of the film will not contact the active plasma. This somewhat reduces the density of the radicals and the ion flows to the wafer surface.

The third widespread configuration of a PA-ALD reactor presented in fig. 2, c is called "ALD reactor with remote plasma". In this case, unlike in the reactors of the first type, for which concentration of the active particles can decrease down to zero in the direction to the wafer surface, here, plasma is present quite near the wafer surface, and thus the flow of the radicals to the wafer is much more higher, than for the reactor of the previous type. In such systems plasma can be formed like in reactors with the *inductive coupled plasma*, ICP), in reactors with a microwave frequency electron-cyclotron plasma, ECR, and microwave plasma rectors. It is important to point out, that the parameters of the plasma and the wafer in such reactors can change independently, expanding possibilities for variation of the characteristics of PA-ALD processes. The level of the working pressure  $(P_d)$  in such reactors equals to some tens or hundreds of pascals.

In the design of the PA-ALD reactor presented in fig. 2, *d*, the microwave source of plasma is connected to the reactor for CVD with a usual thermal activation of the wafer. This type of ALD plasma activation is called "radical-enhanced". Such systems are most frequently used as embedded in CVD/PECVD/PECVD installations with HDP for cleaning of the walls of the reactors after a deposition by plasma etching.

The advantages of PA-ALD are [7] expansion of the experimental conditions for obtaining of the materials with the set properties, including due to expansion of the possibilities for selection of the precursors of the inorganic and organic nature, increase of the rate of deposition at the lowered temperatures (at temperatures less than 500 °C they are considered the most promising), improvement of the properties of coatings, etc. Among the drawbacks are the problems with the conformality of coatings by films at PA-ALD on a developed relief of IC.

# Obtaining of SNTF with the use of the inorganic precursors

The investigated precursors of the inorganic nature include monosilane SiH<sub>4</sub> [13, 14] and its derivative neopentasilane (SiH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>Si [15], trisilylamine (SiH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>N [15–19] and its derivatives [20], chlorine-containing silanes [21–29]. Brief numerical data from the published research works are presented in the table.

**PA-ALD from silanes.** PA-ALD from a monosilane was done on a silicon surface preliminary processed by plasma of nitrogen, on which, according to the authors, the surface terminated by nitrogen — a monolayer of nitrogen with active bonds, was formed. Saturation by the activated nitrogen took place at a pulse with duration more than 60 s. When SiH<sub>4</sub> is injected, it connects to nitrogen with formation of Si—N bonds and N—H bonds. At the next injection cycle of the plasma-activated nitrogen the N-H bonds are removed and replaced with Si—N bonds. The received films are enriched with silicon, at that, the mechanical stress of compressive type of — 810 MPa, the density of 2.5 g/cm<sup>3</sup> and the refraction index n = 1.75 were observed.

For PA-ALD from neopentasilane [15] we should point out a rather long duration of the pulses of the plasma-activated nitrogen (table), at that, even in case of duration of 30 s the saturation of the rate of deposition is not reached (thus, the refraction index decreases from 2.14 down to 2.07). The films demonstrated a composition close to the stoichiometry, and small concentrations of carbon and oxygen (<1 and <3 at. %, accordingly). The concentration of hydrogen was influenced by the power of plasma: for 275 °C and plasma power of 250 and 750 W the concentration of hydrogen (at. %) and the density of films  $(g/cm^3)$  were 11 and 2.21, and 23.5 and 1.86, accordingly. For the structures etched in silicon with the width of 0.25...2.0 µm and depth of 5.45...11.8 µm it was discovered, that the duration of a pulse of nitrogen and power of the plasma discharge did not influence the conformality of the deposition. At that, in general, the conformality can be considered unsatisfactory, because for example, for a rather simple structure with the width of  $0.35 \,\mu\text{m}$  at the depth of only 1.3 µm (recalculated for an aspect relation, it is only 3.7) the conformality of the films was only about 31 %.

**PA-ALD from amines.** In [15-20] the authors from four various groups studied a possibility of obtaining of SNTF with the use of amines and, first of all, trisilylamine  $(SiH_3)_3N$ , the composition of which includes an atom of nitrogen directly connected with atoms of silicon. According to [15-17], the density of SNTF was about 2.8 g/cm<sup>3</sup>, the rates of dissolution in the liquid etchants were a little bit less, than those for the regular SiNH-TF received at PECVD. Most interesting are the attempts to characterize the conformality of SNTF deposition on the transistor structures for the use of a film as a spacer. From the presented data it is visible, that despite the very simple by their form transistor structures, their rapprochement per a step from 240 down to 120 nm led to a deterioration of the conformality of PA-ALD SNTF by 20...30 %. Nevertheless, that was essentially better in comparison with regular PECVD.

The authors of the works [18, 19] established the optimal window of the process with approximately constant rate within the range of 250...350 °C (table). By their composition SNTF were close to the stoichiometric ones, although had the index of refraction of 1.75...1.8 and contained 13.4...8.1 at. % of hydrogen, accordingly. It was established, that roughly a triple increase of power from 100 up to 300 W provided a chance to lower the rate of dissolution of SNTF approximately in 3 times.

In [20] SNTF are investigated, received from the derivatives of trisilylamine (by replacement of SiH<sub>3</sub> groups in the initial precursor by the groups of dimethylaminomethylsilyl or trimethylsilyl). Out of the three synthesized precursors a reagent was chosen as a promising one for PA-ALD SNTF with the gross-formula  $(C_{9}H_{29}N_{3}Si_{3})$ : bis(dimethylaminomethylsilyl) trimethylsilylamine. For deposition a reactor of direct action was used, the temperature of deposition was 250...400 °C, pressure – about 80 Pa, duration of pulses of the precursor -1...9 s, and of the plasma-activated nitrogen -4...15 s. In those modes SNTF had a correlation of Si/N of about a unit and n = 1.97. The concentration of carbon in case of variation of the plasma power within 100...200 W and over increased within the limits of 0...5 at. %. At that, the concentration of oxygen also increased within 7...11 at. %, which the authors explained by oxidation of SNTF, enriched by silicon, in the ambient air after the process. For the structure with the width of  $0.071 \,\mu\text{m}$  and the depth of  $0.375 \ \mu m$  and with slightly inclined walls the conformality at the half of the depth was estimated at the level of 73 %. In [10] it is also possible to find brief tabular data concerning the attempts to use for the PA-ALD the other organic aminosilanes in direct or remote plasma of nitrogen and ammonia: bis(diethylamino)silane, tris(dimethylamino)silane, etc. The specific features of processes of PA-ALD from these precursors were unacceptably low rates of growth (100-th fractions of a nanometer per a cycle), and also value of the refraction index of n = 1.7...1.8.

**PA-ALD from chlorosilanes.** Chronologically, the industrial reagent of dichlorosilane  $(SiH_2Cl_2)$  was investigated first. Unfortunately, the data available in literature concerning the growth processes at PA-ALD are very limited. In [21, 22] the authors present the results of the research of the films received in the experimental reactors of individual type with a remote source of plas-

ma by nitridization of ammonia by plasma of a thin silicon film, grown at the thermal-activated pyrolysis of dichlorosilane at 750 °C. At that, injection of the activated ammonia was the first in the cycle, followed by a pulse purge of the reactor by a mix of  $N_2$ -H<sub>2</sub> and then followed a pulse of dichlorosilane. The results of the research are presented in the table and in more detail in [2], where a direct comparison is done with the results of growth of SNTF at the thermal activation of ALD process with the use of  $SiH_2Cl_2$ . Here we point out that the obtained SNTF had n = 1.6...1.85, [O]  $\approx 2...7$  at. % (which is explained by a possible sputtering of the quartz walls of the plasma generator), [H]  $\approx$  13 at. %, [Cl] ~ 0.5 at. %. The authors [23] compared SNTF, received at PA-ALD from SiH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>, and the organic-silicon compounds with the use of the plasma-activated ammonia, nitrogen, and hydrogen. Certain data concerning the process with dichlorosilane are presented in the table, in more detail the results are considered below.

A series of publications [24–27] present the results of the research done in the industrial batch reactors similar to LPCVD by their design (see fig. 2, e), but working in the cyclic mode. Such reactors were additionally equipped with the devices of the remote highfrequency plasma activation of ammonia supplied to the reactor (Remote Plasma Batch Reactor, RPBR). The deposition was done in cycles from SiH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> at <500 °C. The actual data concerning the process of growth of the films are very few, the numerical data about the processes are presented in the table. In the range of 350...500 °C the authors [25] found a linear variation of the density of films within the range of 2.5...2.75 g/cm<sup>3</sup> and a dome-shaped change of the compressive mechanical stress with a maximum of ~13 MPa at about 450 °C. In [26, 27] a possibility was estimated of the use of PA-ALD SNTF as a spacer material for IC technology with the design-technological nodes of 28...32 nm. The activated ammonia was also the first to be supplied in the deposition cycle. It was demonstrated, that the rates of dissolution in a diluted hydrofluoric acid (Diluted HF, DHF) exponentially decreased with the growth of the temperature of deposition within the range of 400...600 °C. The conformality of deposition on a transistor structure was also studied and it was equal to 100 % for the unary and double pitches, while at the use of PECVD SiNH-TF the conformalities were 60 and 87 %, accordingly. Let us note an interesting result of application of the precursor of monochlorosilane SiH<sub>3</sub>Cl instead of dichlorosilane [27]. It turned out, that SNTF from this reagent had approximately twice smaller speeds of dissolution in DHF, which testified in favor of their higher density.

Research works [28, 29] were done with the use of oligomer  $Si_2Cl_6$  and plasma-activated ammonia. In the work [28] the dose of  $Si_2Cl_6$  supplied to the reactor first

was  $8 \cdot 10^5$  L (L stands for Langmuir, a unit of measurement equal to  $1 \cdot 10^{-6}$  mm of mercury  $\cdot$  s, that is, a product of pressure  $P_d$  for duration of the pulse of the reagent t). For the temperature of deposition of 400  $^{\circ}$ C in SiNH-TF the author discovered 23 at. % of hydrogen, mainly in the form of N–H groups, n = 1.9, density 2.5 g/cm<sup>3</sup>. Presence of chlorine was estimated at the level less than 0.1 at. %. The authors explained the film enrichment with nitrogen by the presence of N-H groups in it. The conformality of SNTF growth on the structure with the inclined walls and a gap in the bottom part of about 0.1 µm and height of 0.5 µm was practically ideal. The authors [29] used a flow reactor with cold walls (travelling-wave reactor, used in the very first research works of ALD [30]), additionally equipped with a plasma source. Besides Si<sub>2</sub>Cl<sub>6</sub> precursor, the dose of which varied within the limits of  $1 \cdot 10^6 \dots 5 \cdot 10^7$  L, ammonia was used with the fixed dose of  $1 \cdot 10^9$  L, and also a nitrogen plasma before injection of the precursor. Thus, the deposition cycle consisted of not usual two stages, but of three stages: precursor/ammonia/activated nitrogen, at that, after each of the stages there was a purge by argon. Application of the nitrogen plasma (100 W, 200 Pa, 50 s) provided a chance to approximately double the rate of deposition from 0.05 up to 0.11 nm/cycle and, thus, to lower the dose of the precursor by almost an order.

#### Deposition with the use of the organic precursors

The whole set [23, 31–35] presents the results of the largest research works of the possibility of reception of SNTF with the use of the PA-ALD from *bis(tertiary-butylamino)silane*, BTBAS,  $(NH^{t}C_{4}H_{9})_{2}SiH_{2}$ . A precursor is a colorless liquid with the density of 0.82 g/cm<sup>3</sup> at 20 °C with the temperature of boiling of 167 °C in normal conditions. For PA-ALD they usually use remote plasma of ammonia, nitrogen and hydrogen in the reactor with ICP with power of 600 W and frequency of excitation of 13.56 MHz. The following results of publications [31–35] may be regarded as the most interesting.

1. In [23] a comparative research was done of the correlation of SNTF density and rates of their dissolution in the hydrofluoric acid diluted with water in proportions 1:100. The films were received in a reactor with ICP, similar to the one described above, at the power of 300...400 W and deposition temperature of 350 °C. As the initial organic precursor, tris-trimethyilaminosilane [(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>N]<sub>3</sub>SiH was used, for comparison reasons, the inorganic precursors SiH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> and trisilylamine (SiH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>N were investigated. As the second nitrogen-containing reagent, the plasma-activated mixes of nitrogen, ammonia and hydrogen were used. In general, all the investigated versions of the precursors were described by a linear dependence within the range of dissolution rate of 0.2...9.0 nm/min and SNTF density of 2.9...2.3 g/cm<sup>3</sup>. In all the types of SNTF no carbon was discovered, however, there was an abnormally high concentration of oxygen in it — from 7 up to 22 at. %. Although the source of oxygen was not explained by the authors, it is possible to assume, that an oxidation of the non-stoichiometric TF can occur in the ambient air already after unloading of the samples from the reactor. The authors, in particular, mentioned such a possibility [20, 36].

2. The growth features were investigated in [31-34]. It was pointed out, that in case of the use of plasma of the hydrogen-containing compounds (NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>) a blocking occurred of the active places of the surfaces (termination), causing a decrease of the deposition rate The maximal values of the deposition rate were reached, when the nitrogen plasma was used.

3. The authors [32] noted the influence of the resi*dence time* parameter  $(\tau, s)$  in the plasma flow chamber on the rate of deposition and properties of SNTF, and called the discovered effect "a redeposition". The value of  $\tau$  was defined as the relation of the known volume of the reactor to the known volume consumption of the plasma-activated gas through the reactor. The effect of redeposition was observed at  $\tau = 0.1...0.9$  s. According to the authors, the essence of the effect consisted in the fact that at big  $\tau$ , i.e. at a slow movement of the plasmaactivated gas in the reactor, the reaction products could get back to plasma, then they disintegrated and were repeatedly deposited on the growing film. In particular, at an increase of  $\tau$  in the range of 0.1...0.9 s the following changes occurred: the refraction index decreased in the range of 1.95...1.72, the concentration of oxygen — 2.5...5 at. %, of carbon - 0.5...1.5 at. %, while the rates of liquid dissolution increased 4 times.

4. With the growth of temperature in the range of 100...500 °C the rate of growth decreased within 0.09...0.015 nm/cycle at duration of a cycle of about 17 s; in the same range of temperatures the SNTF characteristics were: n = 1.63...1.96, correlation Si/N = 0.37...0.66, the concentration of carbon decreased from 25 down to 2 at. %, and the concentration of hydrogen - from 11 down to 5 at. %. An increase of duration of a plasma pulse of nitrogen in the range of 1...15 s led to a certain decrease of the rate of growth within the limits presented above, to variation of the concentration of carbon in the range of 18...8 at. % and to an increase of correlation Si/N in the range of 0.4...0.62. At that, irrespective of the growth conditions, oxygen was discovered in TF with the concentration of about 5 at. %, the source of which was recognized as the quartz walls of the reactor. The quality of SNTF is determined by the deposition temperature: if it is over 500 °C, the films are close to the stoichiometric by their composition and basic properties. Carbon embedding in SNTF is described in the form

of formation of Si-C and C-N bonds [34]. We should point out, that this corresponds to the conclusion of the authors [37] about saturation with carbon of SNTF received during a thermally activated ammonolysis of the same reagent. In fact, the given precursor  $(NH^{t}C_{4}H_{9})_{2}SiH_{2}$  was studied during a decade earlier by the authors of the works quoted above for the purpose of reception of SNTF films in LPCVD by reaction with ammonia at the temperature below 600 °C. In particular, the authors demonstrated, that in comparison with the traditionally used dichlorosilane, application of the organic precursor, at the acceptable level of the deposition rates of 0.4...3.0 nm/min and uniformity of the thickness of coating on the wafers of 200 mm, obviously led to occurrence in the films of carbon (about 7 at. %) of the embedded into the matrix material instead of nitrogen, and to a 5 times higher content of hydrogen (up to 15 at. %).

# Comparison of ALD processes with the other processes for reception of SNTF

Development of the processes for obtaining of the thin films goes alongside with the development of the devices of the micro- and nanoelectronics and MEMS, which use or intend to use, also the materials known under the common name of SNTF. This, for example, explains that the processes of the thermally activated ALD (further, TA-ALD) were basically investigated at the turn of 2000<sup>th</sup>, while the intensive studies of PA-ALD were begun at the turn of 2010s, when the IC technology nodes reached the level of 45 nm and less. Improvement of the technology as a whole demanded a smaller thickness of the thin films of all types. At that, the key parameter of any kind of ALD was the conformality of the deposition.

The author selected two directions for comparison of information concerning PA-ALD SNTF: with TA-ALD processes [2] and with the processes of a lowtemperature plasma-activated deposition in the flow reactors (PECVD) [3, 4]. The standard for comparison are stoichiometric SNTF (S-SNTF) obtained by the industrial method of ammonolysis of dichlorosilane in the low pressure reactors.

*Comparison of the basic characteristics of TA-ALD and PA-ALD.* In both cases, very few experimental data concerning the characteristics are available, the temperature dependences are estimated only in several works. The published results, as a rule, are presented by the separate groups developing their own directions, and the results are not confirmed by the other authors as, for example, it was with reception of SNTF in LPCVD in 1970s...1990s.

In [2] according to about 10 publications it was established, that the temperature of TA-ALD could be lowered by 200 °C and more, compared with the industrial process of ammonolysis of dichlorosilane ( $\sim$ 700 °C). At that, the author would like to mention the recently published patent application [38] of Applied Materials, Inc., in which TA-ALD, employing SiCl<sub>4</sub> and the nitrogen-containing reagents, was announced in the range of 600...725 °C, i.e. only by 50...100 °C lower than the object of comparison. At that, the level of concentration of hydrogen was 10 at. % for 600 °C and it lowered down to 6 at. % at 700 °C. Unfortunately, the publications considered in [2] and [38] did not present concrete results about improvement of conformality for TA-ALD in comparison with the processes of reception of S-SNTF in the flow reactors of low pressure. Thus, we have enough grounds to consider that the known processes with the thermal activation [1, 2] are rather close by characteristics of the processes, composition and properties.

However, the data presented in the table and in [2] concerning the ALD processes point to the abnormally large doses of the precursors used for achievement of an acceptable rate of deposition (in [38] such data are not available at all). The values of the presented doses of the reagents provided an opportunity for the author to undertake a quantitative estimation of the potential efficiency of TA-ALD processes for an industrial production.

For estimation of the values and sufficiency of the doses of the reagents at PA-ALD in comparison with TA-ALD the author accepted the following initial data: density of the stoichiometric  $Si_3N_4 - 3.17 \text{ g/cm}^3$  (in fact, it is less), molecular mass of  $Si_3N_4 - 140$ , wafer—diameter of 200 mm (area  $-314 \text{ cm}^2$ ), averaged rate of growth  $-0.2 \text{ nm/cycle} (0.2 \cdot 10^{-7} \text{ cm/cycle})$ . According to these data, estimation of the volume of SNTF formed on the wafer per one cycle of the process equals to  $\sim 7 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{cycle}$ , or  $2 \cdot 10^{-5} \text{ g}$ , or  $\sim 9 \cdot 10^{16}$  molecule/cycle. Taking into account the real deviations from the accepted values towards reduction of the rate of deposition down to one order, the real deviation of TF density to the smaller value, etc., it is possible to assume, that the value of  $\sim 10^{17}$  molecule/cycle for SNTF formed per a cycle corresponds well to the published experimental data.

For estimation of the characteristic of an pulse of the precursor in accordance with the known Mendeleev — Clapeyron equation we will accept the volume of an individual reactor as ~5 dm<sup>3</sup>, the gas constant — 62.3 mm of mercury  $\cdot$  dm<sup>3</sup>  $\cdot$  Mol<sup>-1</sup>  $\cdot$  K<sup>-1</sup>, deposition temperature — 400 °C (700 K), pressure in the reactor — 100 mm of mercury (according to data in [2], the used pressure was up to 500 mm of mercury). Estimation of the number of molecules in a pulse for the above values gives a value of ~7  $\cdot$  10<sup>21</sup> molecules. For a dose of the precursor of one langmuir (L) the estimation of the number of molecules equals to ~7  $\cdot$  10<sup>13</sup> molecules (which means that in the pulse, calculated above the dose will be  $\sim 10^8$  L). Proceeding from the estimations presented above, the precursor dose, necessary for formation of one monolayer of SNTF is at the level of  $\sim 10^4$  L, which by 4 or 5 orders less, than the data presented in the publications on the experimental doses of the precursors at TA-ALD. The presented estimation allows us to conclude that the efficiency of the use of the precursors at TA-ALD (the fraction of the precursor transferred into TF from the quantity of the precursor injected into the reactor) equals to only hundredth parts of percent, which, no doubt, is insufficient for production. For comparison: according to the author's data, the efficiency of the industrial process of ammonolysis of dichlorosilane in LPCVD is about 5 % [39], and for PECVD – about an order higher. It is necessary to point out that for PA-ALD the doses, necessary for the precursors, turn out to be by several orders less, which testifies to a higher efficiency of such processes.

Comparison of the basic characteristics of PECVD and PA-ALD. Since it is considered, that PA-ALD processes give a chance to lower the temperature of "the ALD window" by several hundreds of degrees, this temperature interval gets into the interval of the temperatures, characteristic for the processes of PECVD and PECVD with HDP. The basic difference of PA-ALD from the plasma-activated processes in the flow reactors is a very low, by orders less, rate of deposition in the comparable temperature intervals. However, the general trend for reduction of the thickness of the films for the modern technologies down to the level of several tens of nanometers definitely smoothes this drawback. At the same time, the conformality of certain processes of PA-ALD in comparison with PECVD is essentially better than it was confirmed by the authors [16, 17, 20, 26–28]. Besides, by composition such films come closer to the stoichiometric ones.

Now, the PA-ALD processes, apparently, are far from being recognized as mature and still developing. The author would like to note the following basic trends in such development. The first one is the search activity for the precursors, not containing chlorine and carbon. The second one is the use of the reactors of "direct action", that is, with a capacitive excitation of the plasma, the simplest reactors, which are actually identical to the industrial reactors of PECVD. Here, it is necessary to point out, that an approximate level of the necessary doses at PA-ALD is realized at rather long durations of the pulses of the reagents, reaching tens of seconds (see the table), which is quite comparable with the duration of the PECVD processes. It is possible to assume, that the well-known (and cheaper) plasma reactors of direct action can turn out to be a good variant for realization of the PA-ALD processes with reference to the lowtemperature SNTF of the satisfactory quality.

As a topical problem for increasing the productivity of the PA-ALD processes the author would mention a search for the ways of the surface processing for increasing the rate of deposition. Such works, in particular, allow us to expect the use of the activated nitrogen [29] or hydrogen [40]. However, processing of the internal surfaces of the complex reliefs of the devices will obviously demand the use of the intensive flows of the activated particles, i.e. an increase of the exciting energy, capable to cause unacceptable infringements in the devices.

#### Conclusion

The plasma-activated low-temperature ALD allows us to receive SNTF at temperatures below 500 °C from the precursors of an inorganic nature (silanes, chlorine derivatives of silanes, amines). Characteristics of the coatings meet the requirements of IC manufacture, ensuring acceptable rates of growth and low rates of dissolution in the liquid etchants on the basis of hydrofluoric acid. The conformality of the growth of coatings at PA-ALD considerably exceeds that of PECVD. The author would like to mention the following trends in development of the PA-ALD processes. The first trend is the search activity concerning the precursors: promising are the precursors of organic nature, allowing us to obtain SNTF with the characteristics acceptable for the modern micro- and nanoelectronic technologies. At the same time, it is necessary to point out, that despite the long-term and repeated attempts to introduce the organic precursors into TF production, it is possible to consider them failed in the cases, when acceptable precursors of the inorganic nature are available. The second trend is the use of the reactors of direct action — the simplest and, actually, identical to the industrial classical reactors of PECVD. The third trend is the search for the ways for processing of the surface for an increase of the rate of deposition.

#### References

1. **Vasilyev V. Yu.** Tehnologii poluchenija tonkih plenok nitrida kremnija dlja mikrojelektroniki i mikrosistemnoj tehniki. Chast 1. Termicheski aktivirovannye processy v protochnyh reaktorah, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 5, pp. 287–296 (in Russian).

2. **Vasilyev V. Yu.** Tehnologii poluchenija tonkih plenok nitrida kremnija dlja mikrojelektroniki i mikrosistemnoj tehniki. Chast 2. Termicheski aktivirovannye processy v reaktorah ciklicheskogo dejstvija reaktorah, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 6, pp. 329–339 (in Russian).

3. **Vasilyev V. Yu.** Tehnologii poluchenija tonkih plenok nitrida kremnija dlja mikrojelektroniki i mikrosistemnoj tehniki. Chast 3. Plazmoaktivirovannye processy v protochnyh reaktorah, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. 2018, vol. 20, no. 9, pp. 542–554 (in Russian).

4. **Vasilyev V. Yu.** Tehnologii poluchenija tonkih plenok nitrida kremnija dlja mikrojelektroniki i mikrosistemnoj tehniki. Chast 4. Processy v protochnyh reaktorah s aktivaciej plazmoj vysokoj plotnosti, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 10, pp. 585–595 (in Russian).

5. Vassiliev V. Y., Sudijono J. L., and Cuthbertson A. Trends in Void-Free Pre-Metal CVD Dielectrics, *Solid State Technol.*, 2001, vol. 44, no. 3, pp. 129–136.

6. George S. M. Atomic Layer Deposition: An Overview, *Chem. Rev.* 2010, vol. 110, no. 1, pp. 111–131.

7. Profijt H. B., Potts S. E., van de Sanden M. C. M. et al. Plasma-Assisted Atomic Layer Deposition: Basics, Opportunities, and Challenges, J. *Vac. Sci. Technol. A.*, 2011, vol. 29, no. 5, pp. 050801–050826.

8. **Kessels E., Profijt H., Potts S.** et al. Plasma Atomic Layer Deposition, *Atomic Layer Deposition of Nanostructures Materials* (Pinna N. and Knez M. Ed.). Weinheim, Germany, Willey-VCH. Verlag, 2012, pp. 131–158.

9. Potts S. E., Kessels W. M. M. Energy-enhanced atomic layer deposition for more process and precursor versatility, *Coord. Chem. Rev.*, 2013, vol. 257, pp. 3254–3270.

10. Xin Meng, Byun Y.-C., Kim H. S. et al. Atomic Layer Deposition of Silicon Nitride Thin Films: A Review of Recent Progress, Challenges, and Outlooks, *Materials.* 2016, no. 9, Article ID 1007, 20 p.

11. Kaloyeros A. E., Jove F. A., Goff J. et al. Review-Silicon Nitride and Silicon Nitride-Rich Thin Film Technologies: Trends in Deposition Techniques and Related Applications, *ECS J. of Solid State Sci. and Techn.*, 2017, vol. 6, no. 10, pp. P691–P714.

12. **Heil S. B. S., Hemmen van J. L., Hodson C. J.** et al. Deposition of TiN and HfO<sub>2</sub> in a commercial 200 mm remote plasma atomic layer deposition reactor, *J. Vac. Sci. Technol. A*, 2007, vol. 25, no. 5, pp. 1357–1366.

13. **King S. W.** Plasma Enhanced Atomic Layer Deposition of SiN:H using  $N_2$  and Silane, *ECS Trans.*, 2010, vol. 32, no. 2, pp. 365–373.

14. **King S. W.** Plasma enhanced atomic layer deposition of SiNx:H and SiO<sub>2</sub>, *J. Vac. Sci. Technol. A.* 2011, vol. 29, no. 4, pp. 041501/1–9.

15. Week S., Nowling G., Fuchigami N. et al. Plasma enhanced atomic layer deposition of silicon nitride using neopentasilane, J. *Vac. Sci. Technol. A.*, 2016, vol. 34, no. 1, pp. 01A140/1–6.

16. **Triyoso D. H., Jaschke V., Shu J.** et al. Robust PEALD SiN spacer for gate first high-k metal gate integration, *Proc. 2012 Int. Conf. on ACO N*, 12851120 (4 p.).

17. **Triyoso D. H., K. Hempel K., S. Ohsiek S.** et al. Evaluation of Low Temperature Silicon Nitride Spacer for High-k Metal Gate Integration, *ECS J. of Sol. State. Sci. Technol.* 2013, vol. 2, no. 11, pp. N222–N227.

18. Jang W., Jeon H., Kang C. et al. Temperature dependence of silicon nitride deposited by remote plasma atomic layer deposition, *Phys. Status Solidi A*, 2014, vol. 211, no. 9, pp. 2166–2171.

19. Jang W., Jeon H., Song H. et al. The effect of plasma power on the properties of low-temperature silicon nitride deposited by RPALD for a gate spacer, *Phys. Status Solidi A.* 2015, vol. 212, no. 12, pp. 2785–2790.

20. **Park J.-M., Jang S. J., Yusup L.** et al. Plasma-enhanced atomic layer deposition of silicon nitride using novel silylamine precursor, *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 2016, vol. 8. no. 32, pp. 20865–20871.

21. Goto H., Shibahara K., Yokoyama S. Atomic layer controlled deposition of silicon nitride with selflimiting mechanism, *Appl. Phys. Lett.*, 1996, vol. 68, no. 23, pp. 3257–3259.

22. Yokoyama S., Goto H., Miyanoto T. et al. Atomic layer controlled deposition of silicon nitride and in situ growth observation by infrared reflection absorption spectroscopy, *Appl. Surf. Sci.*, 1997, vol. 112, pp. 75–78.

23. **Provine J., Schindler P., Kim Y.** et al. Correlation of film density and wet etch rate in hydrofluoric acid of plasma enhanced atomic layer deposited silicon nitride, *AIP Advances*, 2016, vol. 6, no. 6, pp. 065012–065021.

24. Ando T., Ohta Y., Ashihara H. et al. A Silicon Nitride MIM Capacitor for Analog / Mixed-Signal Integrated Circuit using Manufacturable Atomic Layer Deposition Equipment, *ECS Trans.*, 2007, vol. 11, no. 7, pp. 55–60.

25. Nagata K., Nagasaka M., Yamaguchi T. et al. Evaluation of Stress Induced by Plasma Assisted ALD SiN Film, *ECS Trans.*, 2013, vol. 53, no. 3, pp. 51–56.

26. Koehler F., Triyoso D. H., Hussain I. et al. Atomic Layer Deposition of SiN for spacer applications in high-end logic devices, *IOP Conf. Series: Mat. Sci. and Eng.*, 2012, vol. 41, article no. 012006 (4 p.).

27. Koehler F., Triyoso D. H., Hussain I. et al. Challenges in spacer process development for leading-edge high-*k* metal gate technology, *Phys. Status Solidi C*, 2014, vol. 11, no. 1, pp. 73–76.

28. Ovanesyan R. A., Hausmann D. M., Agarwal S. Low-Temperature Conformal Atomic Layer Deposition of  $SiN_x$  Films Using  $Si_2Cl_6$  and  $NH_3$  Plasma, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2015, vol. 7, no. 202, pp. 10806–10813.

29. Yusup L., Park J.-M., Noh Y.-H. et al. Reactivity of different surface sites with silicon chlorides during atomic layer deposition of silicon nitride, *RSC Adv.*, 2016, vol. 6, pp. 68515–68524.

30. Suntola T. Atomic layer epitaxy, *Thin Solid Films*, 1992, vol. 216, pp. 84–89.

31. Knoops H. C. M., Braeken E. M. J., de Peuter K. et al. Atomic Layer Deposition of Silicon Nitride from Bis(tertbutylamino) silane and N<sub>2</sub> Plasma, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2015, vol. 7, no. 35, pp. 19857–19862.

32. Knoops H. C. M., de Peuter K., Kessels W. M. M. Redeposition in plasma-assisted atomic layer deposition: Silicon nitride film quality ruled by the gas residence time, *Appl. Phys. Lett.*, 2015, vol. 107, no. 1, pp. 014102–014106.

33. Ande C. K., Knoops H. C. M., de Peuter K. et al. Role of Surface Termination in Atomic Layer Deposition of Silicon Nitride, *J. Phys. Chem. Lett.*, 2015, vol. 6, no. 18, pp. 3610–3614.

34. Bosch R. H. E. C., Cornelissen L. E., Knoops H. C. M. et al. Atomic Layer Deposition of Silicon Nitride from Bis(Tertiary-Butyl-Amino)Silane and  $N_2$  Plasma Studied by in situ Gas Phase and Surface Infrared Spectroscopy, *Chem. Mater.*, 2016, vol. 28, no. 16, pp. 5864–5871.

35. Andringa A.-M., Perrotta A., de Peuter P. et al. Low-Temperature Plasma-Assisted Atomic Layer Deposition of Silicon Nitride Moisture Permeation Barrier Layers, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2015, vol. 7, no. 40, pp. 22525–22532.

36. **Park K., Yun W.-D., Choi B.-J.** et al. Growth studies and characterization of silicon nitride thin films deposited by alternating exposures to  $Si_2Cl_6$  and  $NH_3$ , *Thin Solid Films*, 2009, vol. 517. pp. 3971–3978.

37. **Gumpher J., Bather W., Mehta N.** et al. Characterization of Low-Temperature Silicon Nitride LPCVD from Bis(tertiarybutylamino)silane and Ammonia, *J. Electrochem. Soc.*, 2004, vol. 151, no. 5, pp. G353–G359.

38. Lu H., Lei P., Kao C.-T. et al. High temperature thermal ALD silicon nitride films. Patent USA. Pub. No.: US 2017/0053792, 16.08.2016.

39. Vasilyev V. Yu. Thin Film Chemical Vapor Deposition in Integrated Circuit Technology: Equipment, Methodology and Thin Film Growth Experience, Nova Science Publishers, Inc.: New York. 2014. 314 p.

40. Yokoyama S., Ikeda N., Kajikawa K. et al. Atomic-layer selective deposition of silicon nitride on hydrogen-terminated Si surfaces, *Appl. Surf. Sci.*, 1998, vol. 130–132, pp. 352–356.

# Элементы MHCT Micro-AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

#### УДК 546.723-31; 543.27.-8

DOI: 10.17587/nmst.20.676-688

С. В. Денисюк, науч. сотр., Н. И. Мухуров, д-р техн. наук, зав. лаб., О. Н. Куданович, канд. техн. наук, зам. зав. лаб.,

Государственное научно-производственное объединение "Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника", г. Минск, 220072, Республика Беларусь, e-mail: mukhurov@oelt.basnet.by

### АВУХЗОННЫЕ ГАЗОВЫЕ СЕНСОРЫ НА ПОДЛОЖКАХ АІ<sub>2</sub>O<sub>3</sub> С ТОНКОПЛЕНОЧНЫМИ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ИЗ ОКСИДА ЖЕЛЕЗА

#### Поступила в редакцию 01.06.2018

Представлены результаты исследования тонких пленок оксида железа на подложках из анодного оксида алюминия и изучения их газочувствительных свойств на базе двухзонных сенсоров. Пленки оксида железа получены окислением при температуре 580 °C пленки металла, предварительно сформированной вакуумным распылением мишени из железа чистотой 99,95 масс. % в среде аргона. Морфология поверхности, химический состав приповерхностного слоя и фазовый состав полученных образцов исследовались методами растровой электронной микроскопии, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и рентгенографического фазового анализа. Газочувствительные свойства сенсоров с чувствительными элементами на основе пленок оксида железа изучены в интервале температур чувствительных элементов от 20 до 500 °C в поверочных газовых смесях, содержащих водород и метан в концентрациях 0,8 и 1,0 об. % соответственно. Данные концентрации значительно ниже взрывоопасных: 4,0 об. % для H<sub>2</sub> и 4,4 об. % для CH<sub>4</sub>. Приведены температурные зависимости газочувствительных свойств пленок оксида железа и определены оптимальные рабочие температуры для детектирования метана (190 °C) и водорода (60 °C). Описаны конструкция двухзонного сенсора на основе подложки из анодного оксида алюминия и методика расчета параметров тонкопленочных нагревательных элементов его нагреваемых зон. Приведен технологический процесс создания двухзонного сенсора и продемонстрированы преимущества использования алюмооксидной технологии. Показана возможность применения двухзонного сенсора на основе пленок оксида железа для селективного детектирования метана и водорода в газовых смесях путем сравнения сигналов от двух чувствительных элементов, работающих параллельно при разной рабочей температуре.

**Ключевые слова:** двухзонный сенсор, подложки из анодного оксида алюминия, тонкие пленки оксида железа, адсорбция, чувствительность, водород, метан

#### Введение

Компактные и недорогие полупроводниковые сенсоры нашли широкое применение во многих областях промышленности, охраны окружающей среды и в быту. Современные газовые сенсоры основаны на использовании тонких пленок газочувствительных материалов, сформированных химическими (золь-гель, CVD) [1] или физическими (осаждение в вакууме) [2, 3] методами на диэлектрических подложках [4]. Основным недостатком существующих газовых сенсоров является низкая селективность, так как достаточно сложно изготовить полупроводниковый чувствительный элемент, взаимодействующий только с одним соединением [5].

В целях улучшения характеристик полупроводниковых газовых сенсоров (селективности, чувствительности, стабильности параметров) используют несколько основных подходов. Для обеспечения более эффективного взаимодействия определяемого компонента газовой смеси с чувствительным слоем сенсора, снижения влияния сигналов от побочных компонентов, присутствие которых в анализируемой смеси продиктовано условиями эксплуатации сенсора (как правило, содержащих одинаковые химические элементы, но отличающиеся химическим составом), и увеличения быстродействия сенсора проводится выбор оптимальной рабочей температуры и режимов нагрева [6, 7]. С целью повысить чувствительность к детектируемому газу создаются многокомпонентные газочувствительные материалы и нанокомпозиты, проводится легирование чувствительного слоя благородными металлами [8, 9]. В последние десятилетия широко исследуют мультисенсорные системы (так называемый электронный нос) на основе матриц сенсоров с различными параметрами [10], способные анализировать многокомпонентные газовые смеси различного состава и селективно детектировать газы в присутствии посторонних примесей. В таких системах низкая селективность отдельно взятого полупроводникового сенсора становится преимуществом, так как анализируется не отклик каждого чувствительного элемента по отдельности, а суммарный "образ", полученный от матрицы сенсоров, в котором данные от всех элементов дополняют друг друга.

Мультисенсорные системы являются наиболее перспективным направлением для создания портативных газоанализаторов, способных определить состав многокомпонентных смесей газов. Однако перед разработчиками подобных систем встает проблема деградации параметров матриц сенсоров при длительной эксплуатации. Для каждого из чувствительных элементов матрицы характерны своя скорость и определенный механизм дрейфа параметров, что следует учитывать при обработке суммарного сигнала. Очевидно, что у элементов, выполненных из одного материала и по одной технологии с разным уровнем и типом легирования, изменения параметров будут происходить схожим образом, снижая число ошибок при анализе состава газовой смеси [9]. В связи с необходимостью уменьшения влияния процессов деградации и снижения энергопотребления перспективным направлением совершенствования приборов "электронный нос" является формирование матрицы сенсоров из однотипных чувствительных элементов на единой подложке [11]. В этом случае сенсоры имеют один тип выходного сигнала, а управление газочувствительными свойствами осуществляется путем вариации состава и свойств газочувствительного материала, а также температуры и режимов нагрева рабочей области. С этой точки зрения наиболее предпочтительным является использование в качестве диэлектрической подложки материалов, отличающихся высокой термомеханической прочностью, таких как оксид алюминия [12].

В работе [13] показаны новые возможности увеличения селективности газового сенсора на основе тонкой пленки оксида металла на подложке из анодного оксида алюминия за счет использования двух рабочих областей (зон), функционирующих при разной температуре. Формирование двух и более рабочих зон сенсора на одной подложке (на одном кристалле) также позволяет снизить энергопотребление сенсора за счет уменьшения паразитных электросопротивлений.

Целью настоящей работы является разработка двухзонных адсорбционно-резистивных сенсоров с тонкопленочными чувствительным элементами на основе оксида железа, сформированными на подложке из анодного оксида алюминия, и исследование их параметров и газочувствительных свойств при разных температурах.

#### Конструкция двухзонного сенсора

Для решения проблемы детектирования отдельных газов в смесях, содержащих несколько компонентов, оказывающих влияние на электрофизические параметры газочувствительных материалов, необходим сенсор, способный выделить сигналы отдельных детектируемых газов в общем выходном сигнале. Такой результат может быть достигнут с использованием матрицы сенсоров, иначе говоря, детектирование компонентов смеси газов осуществляется путем анализа данных от нескольких параллельно работающих чувствительных элементов. Авторами предложена конструкция сенсора (рис. 1) с двумя параллельно работающими чувствительными областями и идентичными тонкопленочными чувствительными элементами на диэлектрической подложке, выполненной из анодного оксида алюминия (АОА) [13].

Две рабочие области сенсора сформированы в виде консолей и с помощью локализующих облас-



Рис. 1. Двухзонный сенсор: 1 — диэлектрическая подложка из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 2 — рабочие области сенсора с металлооксидными чувствительными элементами, системами информационных электродов и нагревателями; 3 — тонкопленочные токопроводящие дорожки из сплава нихром; 4 — контактные площадки системы информационных электродов; 5 — контактные площадки нагревателей; 6 — сквозные щели для отделения рабочих областей от массива подложки

Fig. 1. Dual-zone sensor:  $1 - dielectric substrate of Al_2O_3$ ; 2 - working areas of the sensor with metal oxide sensitive elements, information electrode systems and heaters; <math>3 - thin-film conductive paths made of nichrome alloy; 4 - contact areas of the information electrode system; 5 - contact pads of heaters; 6 - slots for separating working areas from the array of substrate

ти нагрева сквозных щелей отделены от массива диэлектрической подложки. В рабочих областях площадью 2,0 × 2,9 мм на одной из сторон подложки сформированы пленки газочувствительного материала и нанесены тонкопленочные элементы системы информационных электродов, предназначенных для измерения электрического сопротивления пленки полупроводника, а на другой стороне подложки выполнены нагреватели. Разница температур рабочих областей сенсора обеспечивается отличающимися параметрами электрического сопротивления нагревательных элементов, что задается толщиной пленки и конфигурацией меандра. Конструкция и геометрические размеры меандра нагревателя должны учитывать размеры рабочей области, расположение выводов и технологические особенности нанесения пленки металла.

Сопротивление нагревателя при комнатной температуре

$$R = \frac{\rho L}{dh},\tag{1}$$

где ρ — удельное сопротивление материала нагревателя; *L* — общая длина меандра нагревателя; *d* — ширина пленки нагревателя; *h* — толщина пленки нагревателя.

Следует учитывать температурный коэффициент электрического сопротивления а материала нагревательных элементов. Удельное электрическое сопротивление при рабочей температуре

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha (T - 20 \ ^\circ \text{C})), \tag{2}$$

где  $\rho_0$  — удельное сопротивление материала нагревателя при комнатной температуре (20 °C).

Толщина пленки ограничена технологическими возможностями по формированию однородной проводящей пленки металла и была выбрана в интервале 0,2...0,5 мкм, что обусловлено ограничениями технологии вакуумного осаждения по формированию металлических пленок с воспроизводимыми параметрами. Ширина пленки меандра *d* может быть рассчитана по формуле

$$d = \sqrt{\frac{\rho P}{h_{\text{pacy}} R P_0}},\tag{3}$$

где P — расчетная потребляемая мощность, соответствующая заданной рабочей температуре;  $P_0$  — удельная мощность рассеивания (для нихрома  $P_0 = 1 \text{ Br/cm}^2$ );  $h_{\text{pacy}}$  — расчетная толщина пленки.

Таким образом, расчетная длина меандра

$$L_{\text{pacy}} = \frac{Rh}{\rho} d; \qquad (4)$$

$$L_{\text{pacy}} \approx L.$$
 (5)

Учитывая форму меандра и технологию формирования тонких пленок путем осаждения через маски, электрическое сопротивление нагревателя будет

$$R = \frac{\rho}{d} \left( \frac{2ml_1 + (l_2 - 3d)(2m - 1)}{h} + \frac{d(2m - 1)}{2h} \right), \quad (6)$$

где m — число витков меандра;  $l_1$  — длина витка меандра;  $l_2$  — ширина витка меандра; d — ширина витка меандра; d — ширина ветви нагревательного элемента.

В целях соответствия условиям эксплуатации и энергопотребления базовая конструкция сенсора может быть модифицирована путем изменения размера, формы (конфигурации) и числа рабочих областей. Специфическая нанопористая структура пленки АОА позволяет получать подложки с планарными и объемными элементами сложной конфигурации методами фотолитографии и жидкостного травления с прецизионной точностью (клин травления ≤0,01 при толщине подложки до сотен микрометров) [12]. Пределы миниатюризации рабочих областей сенсора определены компромиссом между технологическими возможностями по формированию газочувствительных элементов с воспроизводимыми параметрами и термомеханическими свойствами диэлектрической основы сенсора. Использование анодного оксида алюминия дает возможность создания нагреваемой области с площадью порядка 1 мм<sup>2</sup> и низкими потерями теплоты, что сопоставимо с минимальными площадями областей, приведенными в литературе. Это соответствует общим тенденциям развития сенсоров, которые направлены на миниатюризацию и уменьшение энергопотребления [14].

### Экспериментальные образцы и методика эксперимента

В качестве исходного материала используется алюминий (марка A99) заводского проката с толщиной 100 мкм. После нарезки на пластинки размером 40  $\times$  50 мм алюминий обезжиривается, рихтуется и полируется в смеси фосфорной и ледяной уксусной кислот для устранения дефектов поверхности. Процесс выращивания АОА (электрохимическое окисление) осуществляли в электрохимической ванне в гальваностатическом режиме с раствором 3 %-ной щавелевой кислоты при температуре 10...12 °С и плотности тока 35 мA/см<sup>2</sup> [15]. Анодирование проводили до требуемой толщины подложки, которая составляла 40 мкм, что достаточно для обеспечения приемлемой механической прочности сенсора.

Для формирования топологии пленочных элементов на поверхности подложки АОА создавали фоторезистивную маску с использованием фоторезиста ФП-383, который наносили с помощью установки нанесения фоторезиста "Корунд ЦНФ". После нанесения и сушки позитивного фоторезиста проводили экспонирование через трафаретную маску с последующим удалением засвеченных участков фоторезиста в щелочном растворе. Через полученную маску проводили сквозное травление АОА в растворе хромового ангидрида при температуре 85 °С. Непрореагировавший фоторезист снимали в растворе перекиси водорода и диэтиламида. Параметры процесса фотолитографии аналогичны приведенным в работе [16]. Алюминий стравливали в растворе соляной кислоты. После промывки, обезвоживания и сушки полученные подложки подвергали отжигу при температуре 960 °С в течение 30 мин для перевода АОА из исходной аморфной фазы в поликристаллическую и стабилизации параметров диэлектрика. Тонкопленочные элементы систем информационных электродов и нагревателей сенсора сформированы на поверхности диэлектрических подложек из сплава нихром методами вакуумного осаждения в среде аргона.

Тонкие пленки оксида железа получены термическим окислением на воздухе пленки металла, предварительно сформированной ионно-плазменным осаждением на подложках из АОА. Тонкие металлические пленки на поверхности АОА получали на вакуумной установке УРМ 3.279.013 с использованием мишени Fe с чистотой 99,95 масс. %. Ионно-плазменное осаждение металла осуществлялось в среде аргона при давлении  $5 \cdot 10^{-3}$  мм. рт. ст. с ускоряющим напряжением 1,4 кВ и током анода 0,9...1,0 А, что обеспечивало скорость осаждения металла около 0,01 мкм/мин. Толщины полученных пленок контролировали по свидетелю, и они составляли 0,30...0,35 мкм. После напыления металлические пленки были окислены путем отжига на воздухе в муфельной электропечи сопротивления марки СНОЛ 6,7/1300. Режим отжига образцов включал нагрев до температуры 580 °С со скоростью 4 °С/мин, выдержку при максимальном значении в течение 30 мин и последующее снижение температуры со скоростью 4 °С/мин.

Исследование морфологии поверхности образца проводили методом растровой электронной микроскопии на установке LEO-1420. Фазовый состав пленки оксида железа на поверхности подложек из АОА исследован методом рентгенофазового анализа на установке ДРОН-3 с использованием CuK<sub> $\alpha$ </sub>-излучения (длина волны  $\lambda = 1,540598$  Å) в интервале углов  $2\theta \approx 5...85^\circ$ . Спектры расшифрованы согласно данным таблиц национального бюро стандартов США (ASTM).

Фотоэлектронные спектры получены на рентгеновском фотоэлектронном спектрометре ЭС 2402 с использованием рентгеновского излучения  $K_{\alpha}$ -линии Mg ( $h_{V}$  = 1253,6 эВ). При идентификации фотоэлектронных спектров принимали во внимание значения энергии связи остовных электронов C1s, O1s, Fe2p. Для калибровки спектров использована линия C1s от поверхностных углеводородных загрязнений, для которой энергия связи принята равной 284,6 эВ.

Исследование газочувствительных свойств пленок оксида железа проводили на примере двухзонного сенсора описанной выше конструкции [13] с встречно-штыревой системой электродов, сформированных поверх чувствительного элемента и выполненных из сплава нихром. Испытания сенсора проводили в поверочных газовых смесях, представляющих собой детектируемый газ, разбавленный синтетическим воздухом до заданной концентрации:  ${\rm H}_2-$  0,8 об. % и  ${\rm CH}_4-$  1,0 об. %, что значительно ниже взрывоопасных концентраций (4,0 и 4,4 об. % соответственно). Температуру чувствительного элемента сенсора контролировали путем варьирования мощности, потребляемой тонкопленочным нагревателем, в интервале 0...350 мВт. Испытания сенсора проводили в камере объемом 65 см<sup>3</sup>. В камеру подавали газовую смесь заданного состава с объемным расходом 0,8 см<sup>3</sup>/с. После установления рабочей температуры осуществляли выдержку в течение 2 мин, а затем проводили измерение электрического сопротивления газочувствительной пленки как отношение ее электрического сопротивления в присутствии детектируемого газа к значению электросопротивления в чистом воздухе.

#### Результаты и обсуждение

РЭМ-изображение поверхности образца (рис. 2), полученного отжигом при температуре 580 °C, демонстрирует образование пленки, состоящей из



Рис. 2. РЭМ-изображение пленки Fe, отожженной при температуре 580 °C Fig. 2. SEM image of a Fe film, which was obtained by oxidation at 580 °C

- НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА, Том 20, № 11, 2018 —



**Рис. 3.** Рентгенограмма пленки оксида железа на подожке из  $Al_2O_3$ Fig. 3. X-ray diffraction pattern of the iron oxide film on the  $Al_2O_3$ 

зерен округлой формы, характерный размер которых составляет от 50 до 100 нм, а также игольчатых кристаллитов размером до 1 мкм.

Результаты исследования методом рентгенофазового анализа пленки оксида железа показывают наличие дифракционных максимумов, относящихся к кристаллической структуре  $Fe_2O_3$  (рис. 3). Сопоставление расположения дифракционных максимумов с данными базы дифракционных стандартов PDF2 ICDD свидетельствует об образовании поликристаллической пленки  $\alpha$ -фазы  $Fe_2O_3$  (гематит) с ромбоэдрической кристаллической решеткой (параметры решетки a = 5,0 Å; c = 13,7 Å). Кроме того, на рентгенограмме присутствуют дифракционные максимумы, соответствующие кристаллической структуре  $Al_2O_3$ , представленной смесью фаз с преобладанием  $\gamma$ -фазы [17, 18]. На рис. 4 представлен рентгеновский фотоэлектронный спектр тонкой пленки оксида железа. В спектре пленки оксида железа были обнаружены пики элементов Fe и O. Помимо фотоэлектронных линий остовных электронов (C1s, O1s, Fe2p), в спектре образца присутствуют также Ожелинии кислорода и железа. Анализ рентгеновских фотоэлектронных спектров образца позволил установить химическое состояние Fe и O и определить вклад каждого из состояний в состав приповерхностной области образца (на глубину до 5 нм). Положения данных пиков совпадают со справочными материалами [19] и литературными данными по исследованию подобных материалов [20, 21].

На рис. 5 представлен спектр РФЭС 1*s*-электронов кислорода исследуемого образца, из которого видно, что основной вклад в спектр O1*s* вносит

> пик двухвалентного кислорода в составе оксида железа с энергией 529,7 эВ. "Размытие" максимума в области 529,0...530,2 эВ может быть объяснено образованием оксидов железа с различными степенями окисления (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, FeOOH, Fe<sub>2</sub>O<sub>3 -x</sub>). Образцы содержат также кислород в составе ОН-групп, что подтверждается наличием пика с энергией 530,85 эВ. Максимумы с большей энергией могут быть отнесены к различным формам поверхностной хемосорбции кислорода  $O_2^-$ ,  $O^-$  и O<sup>2-</sup> (рис. 5).



Fig. 4. X-ray photoelectron spectrum of an iron oxide film

680





Fig. 5. Spectra of spanning oxygen lines (O1s) of an iron oxide film

Для процессов адсорбции детектируемого газа поверхностью газочувствительного оксида металла важную роль играют число и характер центров адсорбции, особенно бренстедовских кислотных центров, в частности поверхностные ОН-группы. По данным, приведенным в работе [20], прослеживается отчетливая корреляция между концентрацией поверхностных ОН-групп и газочувствительными свойствами оксидных пленок на основе Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Более высокая интенсивность пиков, соответствующих OH-группам в пленках Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на пористом  $Al_2O_3$  (рис. 5), по сравнению с интенсивностью соответствующего пика в нанопорошках Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> подтверждает более высокую концентрацию ОН-групп на поверхности пленки, участвующих в процессах адсорбции. Это позволяет предполагать высокие газочувствительные свойства пленок оксида железа на поверхности подложки из АОА [22].

В спектре РФЭС 2*p*-электронов Fe (рис. 6) максимум с энергией 710,7 эВ указывает на наличие трехвалентного железа в составе оксида Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, что подтверждается данными рентгенофазового анализа (см. рис. 3). Пик с энергией 709,0 эВ может принадлежать атомам железа в меньшей степени окисления, чем в Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (возможно, FeO), присутствующим в поверхностном слое образца. Особенность спектра в области 711,3 эВ может быть связана с присутствием на поверхности гидроксида FeOOH. Исходя из интенсивности соответствующих пиков, состав приповерхностного слоя пленки оксида железа, полученной окислением металла при 580 °C, включает оксиды Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (38 %) и FeO (30 %) и гидроксид FeOOH (32 %). В объеме пленки содержание FeO и FeOOH незначительно ввиду



Рис. 6. Спектры остовных линий железа (Fe2p) пленки оксида железа

Fig. 6. Spectra of core lines of iron (Fe2p) of an iron oxide film

отсутствия соответствующих фаз в рентгенограммах образцов.

Результаты исследования газочувствительности тонких пленок оксида железа представлены на рис. 7. В воздушной смеси с концентрацией метана, равной 1,0 об. %, сенсоры на основе исследуемой пленки оксида железа демонстрируют отклик, значение которого незначительно уменьшается с увеличением мощности нагрева рабочей области в интервале 50...350 мВт, что соответствует температурам 70...500 °С. В воздушной смеси, содержащей водород в концентрации 0,8 об. %, газочувствительная пленка оксида железа увеличивает свое электрическое сопротивление в 1,7-1,8 раза при мощности нагрева 50...120 мВт, что соответствует температурам 70...200 °С, а при дальнейшем увеличении температуры рабочей области до 500 °С отклик сенсора уменьшается.

Исходя из приведенных данных, можно определить оптимальные температуры чувствительных элементов двухзонного сенсора для селективного детектирования метана и водорода. Для анализа смеси, включающей метан и водород (см. рис. 6), оптимальные температуры чувствительных зон соответствуют мощностям нагрева в 100 и 300 мВт, что соответствует температурам в 60 и 190 °С. Выбор данных параметров нагрева чувствительных зон обусловлен значительным изменением газочувствительности металлооксидной пленки к водороду от 1,75 (60 °C) до 1,27 (190 °C) при незначительном изменении чувствительности к метану. Таким образом, при анализе газовой смеси основной вклад в разность откликов от обеих чувствительных зон сенсора вносит присутствующий в



Рис. 7. Чувствительность сенсора на основе Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> к водороду в воздушной смеси с концентрацией 0,8 об. % и метану в воздушной смеси с концентрацией 1,0 об. %

Fig. 7. Sensitivity of a sensor based on  $Fe_2O_3$  to hydrogen in an air mixture with a concentration of 0.8 vol. % and methane in an air mixture with a concentration of 1.0 vol. %

анализируемой смеси водород, что позволяет его уверенно детектировать в присутствии метана.

#### Заключение

Исследованы морфология, фазовый состав и химический состав приповерхностного слоя тонких пленок оксида железа, полученных термическим окислением предварительно сформированной пленки металла на подложках из анодного оксида алюминия. Выявлен смешанный состав приповерхностного слоя оксида, включающий Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO и FeOOH. Испытания сенсоров на основе исслелованных оксидных пленок с использованием поверочных газовых смесей показали наличие отклика в присутствии метана с концентрацией 1,0 об. % и водорода с концентрацией 0,8 об. % в интервале рабочих температур 20...225 °С. Определены температурные зависимости чувствительности сенсора на основе пленки оксида железа к детектируемым газам. Показаны возможности по анализу смесей газов с использование сенсорной матрицы из двух чувствительных зон. Согласно полученным данным оптимальные температуры чувствительных элементов двухзонного сенсора для селективного детектирования водорода и метана составляют 60 и 190 °С.

#### Список литературы

1. Arafat M. M., Dinan B., Akbar Sheikh A., Haseeb A. S. M. A. Gas sensors based on one dimensional nanostructured metal-oxides: a review // Sensors. 2012. Vol. 12. P. 7207-7258.

2. Larin A., Womble P. C., Dobrokhotov V. Hybrid  $SnO_2/TiO_2$  nanocomposites for selective detection of ultra-low hydrogen sulfide concentrations in complex backgrounds // Sensors. 2016. Vol. 16. P. 1373.

3. **Rydosz A., Szkudlarek A.** Gas-sensing performance of M-doped CuO-based thin films working at different temperatures upon exposure to propane // Sensors. 2015. Vol. 15. P. 20069–20085.

4. Каттралл Р. В. Химические сенсоры. М.: Научный мир, 2000. 144 с.

5. Дрейзин В. Э., Брежнева Е. О. Сравнительный анализ характеристик промышленных газочувствительных датчиков // Датчики и системы. 2011. № 3. С. 68—78.

6. Presmanes L., Thimont Y., Chapelle A., Blanc F., Talhi C., Bonningue C., Barnabé A., Menini P., Tailhades P. Highly sensitive sputtered ZnO:Ga thin films integrated by a simple stencil mask process on microsensor platforms for sub-ppm acetaldehyde detection // Sensors. 2017. Vol. 17. P. 1055–1066.

7. Шапошник А. В., Звягин А. А., Васильев А. А., Рябцев С. В., Шапошник Д. А., Назаренко И. Н., Буслов В. А. Определение оптимальных температурных режимов работы полупроводниковых сенсоров // Сорбционные и хроматографические процессы. 2008. № 3. С. 501—506.

8. Sun Y.-F., Liu S.-B., Meng F. L., Liu J. Y., Jin Z., Kong L. T., Liu J. H. Metal oxide nanostructures and their gas sensing properties: a review // Sensors. 2012. Vol. 12. P. 2610–2631.

9. Пронин И. А., Аверин И. А., Александрова О. А., Мошников В. А. Модифицирование селективных и газочувствительных свойств резистивных адсорбционных сенсоров путем целенаправленного легирования // Датчики и системы. 2013. № 3 (166). С. 13—16.

10. Сысоев В. В., Мусатов В. Ю. Газоаналитические приборы "электронный нос". Саратов: Саратовский гос. технический ун-т, 2011. 98 с.

11. **Лашков А. В., Доброхотов В. В., Сысоев В. В.** Термокаталитический мультисенсорный чип // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 9. С. 195—201.

12. Мухуров Н. И., Ефремов Г. И., Куданович О. Н. Устройства микромеханики и микросенсорики на нанопористом оксиде алюминия. Минск: Бестпринт, 2005. 112 с.

13. Мухуров Н. И., Денисюк С. В., Куданович О. Н. Адсорбционно-резистивный газовый сенсор. Пат. РБ № 10166, 17.03.2014.

14. **Dahlin A. B.** Size matters: problems and advantages associated with highly miniaturized sensors // Sensors. 2012. Vol. 12 (3). P. 3018–3036.

15. Гасенкова И. В., Лыньков Л. М., Мухуров Н. И., Вахиох М. Я. Пороговый сенсор ионизирующих излучений // Доклады БГУИР. 2013. № 8 (78). С. 108—111.

16. Мухуров Н. И., Гасенкова И. В., Андрухович И. М. Особенности формирования прецизионных чувствительных элементов датчиков космической плазмы // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 1 (174). С. 48—56.

17. **Gasenkova I. V., Ostapenko E. V.** Effect of Annealing on the Phase Composition and Morphology of  $Al_2O_3$  Formed in a Complex Electrolyte // The Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2013. Vol. 7, N. 3. P. 536–541.

18. Mardilovich P. P., Govyadinov A. N., Mukhurov N. I., Rzhevskii A., Paterson R. New and modified anodic alumina membranes Part I. Thermotreatment of anodic alumina membranes // Journal of Membrane Science. 1995. Vol. 98, Iss. 1–2. P. 131–142.

19. Нефедов В. И. Рентгеноэлектронная спектроскопия химических соединений: справочник. М.: Химия, 1984. 256 с.

20. Карпова С. С., Мошников В. А., Мякин С. В., Коловангина Е. С. Функциональный состав поверхности и сенсорные свойства ZnO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> // Физика и техника полупроводников. 2013. Т. 47, вып. 3. С. 369—372.

21. Grosvenor A. P., Kobe B. A., Biesinger M. C., Mcintyre N. S. Investigation of multiplet splitting of Fe 2p XPS spectra and bonding in iron compounds // Surface and interface analiss. 2004. Vol. 36. P. 1564—1574.

22. Карпова С. С., Мошников В. А., Максимов А. И., Мякин С. В., Казанцева Н. Е. Исследование влияния кислотно-основных свойств поверхности оксидов ZnO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> на их газочувствительность по отношению к парам этанола // Физика и техника полупроводников. 2013. Т. 47, Вып. 8. С. 1022–1026.

#### S. V. Denisyuk, Researcher, N. I. Mukhurov, D. Sci., Head of Laboratory,

**O. N. Kudanovich,** D. Sci., Deputy Head of Laboratory

SSPA "Optics, Optoelectronics, and Laser Technology", 68 Nezavisimosti avenue, 220072, Minsk, Republic of Belarus

Corresponding author:

**Mukhurov Nikolay I.,** D. Sci., Head of Laboratory, SSPA "Optics, Optoelectronics and Laser Technology", 68 Nezavisimosti avenue, Minsk, 220072, Republic of Belarus, e-mail: mukhurov@oelt.basnet.by

# Dual-Zone Gas Sensors on $Al_2 O_3$ Substrates with Thin-Film Sensors from Iron Oxide

Received on June 1, 2018 Accepted on June 28, 2018

The results of research of iron oxide thin films on substrates of anodic aluminum oxide, and studying of their gas-sensing properties on the base of dual-zone sensors are presented. Iron oxide films were obtained by oxidation at temperature of 580 °C of a metal film preformed by vacuum sputtering of iron target with the purity of 99.95 wt. % in argon environment. Surface morphology, chemical composition of subsurface and phase composition of the received samples were studied by methods of scanning electron microscopy, x-ray photoelectronic spectroscopy and x-ray phase analysis. Gas-sensitive properties of sensors with sensitive elements based on iron oxide films were studied in the temperature range of sensitive elements from 20 to 500 °C in calibration gas mixtures containing hydrogen and methane at concentrations of 0.8 and 1.0 of vol. %, respectively. Such concentrations are significantly lower than explosive: 4.0 vol. % for  $H_2$  and 4.4 vol. % for  $CH_4$ . The temperature dependences for gas-sensitive properties of iron oxide films and the optimum operating temperatures for detection of methane (190 °C) and hydrogen (60 °C) are shown. The design of dual-zone sensor based on substrate of anodic aluminum oxide and method of calculation of parameters of thin-film heating elements of its heated zones are described. The technological process of creation of dual-zone sensor is shown and the advantages of using of aluminum oxide technology is demonstrated. The possibility of use of dual-zone sensor based on iron oxide films for selective detection of methane and hydrogen gas mixtures by comparing the signals from the two sensitive elements working in parallel at different working temperature is shown.

**Keywords:** dual-zone sensor, sensor with two active areas, substrate of anodic aluminum oxide, thin films of iron oxide, adsorption, sensitive, hydrogen, methane

#### For citation:

**Denisyuk S. V., Mukhurov N. I., Kudanovich O. N.** Dual-Zone Gas Sensors on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Substrates with Thin-Film Sensors from Iron Oxide, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 11, pp. 676–688.

DOI: 10.17587/nmst.20.676-688

#### Introduction

Compact semiconductor sensors are widely used in many industries, environmental protection and in everyday life. Gas sensors are based on gas-sensitive thin films materials formed by chemical (sol-gel, CVD) [1] or physical (vacuum deposition) [2, 3] methods on dielectric substrates [4]. The main their disadvantage is the low selectivity, because it is quite difficult to fabricate semiconductive sensor that communicates with only a single molecular entity [5].

In order to improve the characteristics of semiconductor gas sensors (selectivity, sensitivity, stability parameters) several approaches are used. To ensure a more effective interaction between the component-defined gas mixture with a sensitive layer of a sensor, reduction the influence of signals from the side components, whose presence in the analyzed mixture dictated by conditions of sensor's usage (typically contain the same chemical elements but differ in chemical composition), and increase the speed of the sensor is done by selecting the optimal working temperature and heat [6, 7]. In order to increase sensitivity to detectable gas, the multipart gas-sensitive materials and nanocomposites are created, the doping of sensitive layer of noble metals is conducted [8, 9]. In recent decades, the multisensory systems (so-called "electronic nose") based on sensors with different parameters [10], capable of analyzing of multicomponent gas mixtures of various compositions and to selectively detecting gases in the presence of impurities, have been extensively studied. In such systems, the low selectivity of a single semiconductor sensor becomes an advantage, since it is not the response of each sensing element individually that is analyzed, but the total "image" obtained from the sensor array in which the data from all the elements complement each other.

Multisensory systems are the most promising direction for creating of portable gas analyzers capable of determining the composition of multicomponent gas mixtures. However, the developers of such systems face the problem of degradation of parameters of sensor arrays during long-term operation. Each of the sensitive elements of the matrix is characterized by its own speed and a certain mechanism for drifting the parameters, which should be taken into account when processing the total signal. Obviously, for elements made of one material and one technology with different levels and types of doping, the parameters will change in a similar way, reducing the number of errors in analyzing the composition of the gas mixture [9]. In connection with the need to reduce the impact of degradation processes and reduce energy consumption, a promising area for improving "electronic nose" devices is the formation of a matrix of sensors from the same type of sensitive elements on a single substrate [11]. In this case, the sensors have one type of output signal, and the control of gas sensitive properties is carried out by varying the composition and properties of the gas sensitive material, as well as the temperature and heating modes of the working area. From this point of view, the use of materials characterized by high thermomechanical strength, such as aluminum oxide [12], is preferred as the dielectric substrate.

In [13], new possibilities for increasing the selectivity of a gas sensor based on a thin film of metal oxide on an anodic alumina substrate by using two working regions (zones) operating at different temperatures are shown. The formation of two or more working areas of the sensor on a single substrate (on a single chip) also reduces the energy consumption of the sensor by reducing the parasitic electrical resistances.

The aim of the work is to develop dual-zone adsorption-resistive sensors with thin-film sensitive elements based on iron oxide formed on an anodic aluminum oxide substrate and to study their parameters and gas sensitive properties at different temperatures.

#### Design of the dual-zone sensor

To solve the problem of individual gases detecting in mixtures containing several components that affect the electrophysical parameters of gas sensitive materials, a sensor is required that can separate the signals of individual detectable gases in the total output signal. Such a result can be achieved using a sensor array, in other words, the detection of gas mixture components is carried out by analyzing data from several parallel operating sensing elements. The authors propose a sensor design (fig. 1) with two parallel sensitive regions and identical thin-film sensitive elements on a dielectric substrate made of anodic aluminum oxide (AAO) [13].

The two working regions of the sensor are formed in the form of consoles and are separated from the array of dielectric substrate by means of the localizing heating region of the through gaps. In working areas of  $2.0 \times 2.9$  mm on one side of the substrate, films of a gas sensitive material are formed and thin-film elements of a system of information electrodes designed to measure the electrical resistance of the semiconductor film are deposited, and heaters are made on the other side of the substrate. The difference in temperature of the sensor working areas is provided by different parameters of the electrical resistance of the heating elements, which is determined by the film thickness and the meander configuration. The design and geometric dimensions of the meander of the heater must take into account the dimensions of the working area, the arrangement of the terminals and the technological features of depositing the metal film.

Resistance of the heater at room temperature:

$$R = \frac{\rho L}{dh},\tag{1}$$

where  $\rho$  is the resistivity of heater material, *L* is the total length of the heater meander, *d* is the heater film width, *h* is the thickness of heater film.

It is necessary to take into account the temperature coefficient of electrical resistance  $\alpha$  of the material of the heating elements. Specific electrical resistance at operating temperature

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha (T - 20 \ ^\circ \text{C})), \tag{2}$$

where  $\rho_0$  — resistivity of the heater material at room temperature (20 °C).

The thickness of the film is limited by the technological capabilities to form a homogeneous conductive metal film and was chosen in the range 0.2...0.5  $\mu$ m, which is due to the limitations of vacuum deposition technology for the formation of metal films with reproducible parameters. The width of the meander film *d* can be calculated from

$$d = \sqrt{\frac{\rho P}{h_{\rm EST} R P_0}},\tag{3}$$

where *P* is the rated power consumption corresponding to a given working temperature,  $P_0$  is the specific power dissipation (for nichrome  $P_0 = 1$  W/cm<sup>2</sup>),  $h_{\text{EST}}$  is the estimated film thickness.

Thus, the estimated length of the meander

$$L_{\rm EST} = \frac{Rh}{\rho} d; \qquad (4)$$

$$L_{\rm EST} \approx L.$$
 (5)

Given the shape of the meander and the technology of forming thin films by deposition through masks, the electrical resistance of the heater will be

$$R = \frac{\rho}{d} \left( \frac{2ml_1 + (l_2 - 3d)(2m - 1)}{h} + \frac{d(2m - 1)}{2h} \right), \quad (6)$$

where *m* is the number of meander turns;  $(l)_1$  is the meander coil length;  $(l)_2$  is the meander coil width, *d* is the width of the branch of the heating element.

In order to meet operating conditions and energy consumption, the basic design of the sensor can be modified by changing the size, shape (configuration) and number of working areas. The specific nanoporous structure of the AAO film makes it possible to obtain substrates with planar and volumetric elements of a complex configuration by photolithography and liquid etching with precision accuracy (etching wedge  $\leq 0.01$  at a substrate thickness of up to hundreds of  $\mu$ m) [12]. The limits of miniaturization of the sensor working areas are determined by a compromise between technological capabilities for the formation of gas sensitive elements with reproducible parameters and thermomechanical properties of the dielectric basis of the sensor. The use of anodic aluminum oxide makes it possible to create a heated area with an area of the order of 1 mm<sup>2</sup> and low heat losses, which is comparable to the minimum areas of the segments given in the literature. This corresponds to the general tendencies of sensor development, which are aimed at miniaturization and reduction of energy consumption [14].

#### Experimental samples and experimental procedure

Aluminum (grade A99) of factory rolled products with a thickness of 100  $\mu$ m is used as the raw material. After cutting into plates of 40 × 50 mm, aluminum is degreased, trimmed and polished in a mixture of phosphoric and glacial acetic acids to remove surface defects. The process of AAO growing (electrochemical oxidation) was carried out in an electrochemical bath in galvanostatic mode with a solution of 3 % of oxalic acid at a temperature of 10...12 °C and a current density of 35 mA/cm<sup>2</sup> [15]. The anodization was carried out to the required substrate thickness, which was 40  $\mu$ m, which is sufficient to provide an acceptable mechanical strength of the sensor.

To form the topology of the film elements on the surface of the AAO substrate, a photoresist mask was created using a photoresist FP-383, which was applied with a photoresist application device "Corundum CNF". After application and drying of the positive photoresist, exposure was carried out through a screen mask, followed by removal of the exposed areas of the photoresist in an alkaline solution. Through the obtained mask, a continuous etching of AAO in a solution of chromic anhydride was carried out at a temperature of 85 °C. The unreacted photoresist was removed in a solution of hydrogen peroxide and diethylamide. The parameters of the photolithography process are similar to those given in [16]. Aluminum was removed in a solution of hydrochloric acid. After washing, dewatering and drying, the resulting substrates were annealed at 960 °C for 30 min to convert the AAO from the initial amorphous phase to polycrystalline and stabilize the dielectric parameters. Thin film elements of information electrode systems and sensor heaters are formed on the surface of dielectric substrates from nichrome alloy by vacuum deposition methods in argon medium.

Thin films of iron oxide were obtained by thermal oxidation of a metal film in air, previously formed by ion-plasma deposition on AAO substrates. Thin metal films on the surface of the AAO were obtained on a vacuum unit URM 3.279.013 using a Fe target with a purity of 99.95 WT %. Ion-plasma deposition of the metal was carried out in argon at a pressure of  $5 \cdot 10^{-3}$  mm Hg with an accelerating voltage of 1.4 kV and anode current of 0.9...1.0 A, which provided a metal deposition rate of about 0.01 µm/min. The thicknesses of the resulting films were monitored by a witness and they were 0.30...0.35 µm. After spraying, the metal films were oxidized by annealing in air in the muffle electric furnace of resistance SNOL 6.7/1300. The annealing mode of the samples included heating to a temperature of 580 °C at a rate of 4 °C/min, holding for a maximum value of 30 minutes and then lowering the temperature at a rate of 4 °C/min.

The morphology of the sample surface was studied by scanning electron microscopy using the LEO-1420 unit. The phase composition of the iron oxide film on the surface of the substrates from AAO was studied by X-ray diffraction analysis using DRON-3 apparatus using CuK<sub> $\alpha$ </sub> radiation (wavelength  $\lambda = 1.540598$  Å) in the range of angles  $2\theta \approx 5...85^\circ$ . The spectra are decoded according to the tables of the National Bureau of Standards of the USA (ASTM).

Photoelectron spectra were obtained with X-ray photoelectron spectrometer ES 2402 using X-ray radiation of the K<sub> $\alpha$ </sub>-line Mg (hv = 1253.6 eV). When identifying the photoelectron spectra, the binding energy of the core electrons C1s, O1s, Fe2p was taken into account. For the calibration of spectra, the C1s line from surface hydrocarbon contamination was used, for which the binding energy was assumed equal to 284.6 eV.

Investigation of gas-sensitive properties of iron oxide films was carried out using the example of a dualzone sensor of the above mentioned construction [13] with a counter-pin system of electrodes formed over the sensitive element and made of nichrome alloy. The sensor tests were carried out in the calibration gas mixtures, which are a detectable gas diluted with synthetic air to a specified concentration:  $\rm H_2-0.8$  vol. % and  $\rm CH_4-$ 1.0 vol. %, which is significantly lower than the explosive concentrations (4.0 vol. % and 4.4 vol. %, respectively). The temperature of the sensing element of the sensor was monitored by varying the power consumed by the thin film heater in the range 0...350 mW. The sensor tests were carried out in a chamber with a volume of 65 cm<sup>3</sup>. A gas mixture of a given composition with a volume flow of 0.8 cm<sup>3</sup>/sec was fed into the chamber. After the operating temperature was determined, the exposure was held for 2 minutes, and then the electrical resistance of the gas sensitive film was measured as a ratio of its electrical resistance in the presence of the detected gas to the electrical resistance value in fresh air.

#### **Results and discussion**

The SEM image of the sample surface (fig. 2), obtained by annealing at a temperature of 580 °C, dem-

onstrates the formation of a film consisting of roundshaped grains whose characteristic size is 50 to 100 nm, as well as needle crystallites up to 1  $\mu$ m in size.

The results of the X-ray diffraction analysis of the iron oxide film show the presence of diffraction maxima related to the crystal structure of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (fig. 3). Comparison of the location of the diffraction maxima with the base of the diffraction standards PDF2 ICDD indicates the formation of a polycrystalline film of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  $\alpha$ -phase (hematite) with a rhombohedral crystal lattice (lattice parameters a = 5.0 Å, c = 13.7 Å). In addition, the diffraction maxima corresponding to the crystal structure of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> represented by a mixture of phases with a predominance of the  $\gamma$ -phase are present on the roentgenogram [17, 18].

Fig. 4 shows the X-ray photoelectron spectrum of a thin film of iron oxide. In the spectrum of the iron oxide film, peaks of Fe and O elements were observed. In addition to the photoelectron lines of the core electrons (C1s, O1s, Fe2p), the Auger lines of oxygen and iron are also present in the spectrum of the sample. An analysis of the X-ray photoelectron spectra of the sample made it possible to establish the chemical state of Fe and O, and to determine the contribution of each of the states to the composition of the near-surface region of the sample (to a depth of up to 5 nm). The positions of these peaks coincide with the reference materials [19] and the literature data on the study of similar materials [20, 21].

Fig. 5 shows the XPS spectrum of the 1s-electrons of oxygen in the sample, from which it can be seen that the main contribution to the O1s spectrum is made by the peak of divalent oxygen in the composition of iron oxide with an energy of 529.7 eV. "Blurring" of the maximum in the range of 529.0...530.2 eV can be explained by the formation of iron oxides with different degrees of oxidation (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, FeOOH, Fe<sub>2</sub>O<sub>3 - x</sub>). The samples also contain oxygen in the composition of OH groups, which is confirmed by the presence of a peak with an energy of 530.85 eV. Maxima with higher energy can be attributed to various forms of surface chemisorption of oxygen O<sub>2</sub><sup>-</sup>, O<sup>-</sup> and O<sup>2-</sup> (fig. 5).

For adsorption of the detectable gas by the gas sensitive metal oxide surface, the number and nature of the adsorption centers, especially the Brönsted acid sites, in particular the surface OH groups play an important role. According to the data given in [20], there is a clear correlation between the concentration of surface OH groups and the gas-sensitive properties of oxide films based on Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. The higher intensity of the peaks corresponding to OH groups in Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films on porous Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (fig. 5) compared to the intensity of the corresponding peak in Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopowders confirms the higher concentration of OH groups on the surface of the film participating in the adsorption processes. This allows one to assume the high gas-sensitive properties of iron oxide films on the substrate surface from AAO [22].

In the XPS spectrum of 2p-electrons of Fe (fig. 6), a maximum with an energy of 710.7 eV indicates the presence of trivalent iron in the composition of  $Fe_2O_3$ oxide, which is confirmed by X-ray phase analysis data (see fig. 3). A peak with an energy of 709.0 eV may belong to iron atoms to a lesser degree of oxidation than in  $Fe_2O_3$  (possibly FeO) present in the surface layer of the sample. The spectrum feature in the region of 711.3 eV can be associated with the presence of FeOOH hydroxide on the surface. Based on the intensity of the respective peaks, the composition of the near-surface layer of the iron oxide film obtained by oxidizing of metal at 580 °C includes Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (38 %) and FeO (30 %) oxides and FeOOH hydroxide (32 %). In the film volume, the FeO and FeOOH contents are insignificant due to the absence of corresponding phases in the X-ray patterns of the samples.

The results of an investigation of the gas sensitivity of thin films of iron oxide are shown in fig. 7. In an air mixture with a methane concentration of 1.0 vol. %, the sensors based on the iron oxide film under study show a response, the value of which decreases insignificantly with an increase in the heating power of the working region in the range of 50...350 mW, which corresponds to temperatures of 70...500 °C. In an air mixture containing hydrogen at a concentration of 0.8 vol. %, the gas-sensitive film of iron oxide increases its electrical resistance by 1.7-1.8 times at heating power of 50...120 mW, which corresponds to temperatures of 70...200 °C, and with a further increase in the temperature of the working region to 500 °C the sensor response decreases.

Based on the above data, it is possible to determine the optimum temperatures of the sensing elements of a dual-zone sensor for selective detection of methane and hydrogen. For the analysis of a mixture including methane and hydrogen (see fig. 6), the optimum temperatures of the sensitive zones correspond to heating capacities of 100 and 300 mW, which corresponds to temperatures of 60 and 190 °C. The choice of these parameters for heating of sensitive zones is caused by a significant change in the gas sensitivity of the metal oxide film to hydrogen from 1.75 (60 °C) to 1.27 (190 °C) with a slight change in the sensitivity to methane. Thus, when analyzing a gas mixture, hydrogen, which is present in the analyzed mixture, makes the main contribution to the difference of responses from both sensitive zones of the sensor, which allows it to be detected confidently in the presence of methane.

#### Conclusion

The morphology, phase composition, and chemical composition of the near-surface layer of thin iron oxide films obtained by thermal oxidation of a preformed metal film on anodic alumina substrates were studied. A mixed composition of the near-surface oxide layer, including Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO and FeOOH, was revealed. The sensor tests on the basis of the oxide films were studied using gas calibration mixtures showed the presence of a response in the presence of methane at a concentration of 1.0 vol. % and hydrogen with a concentration of 0.8 vol. % in the operating temperature range of 20 to 225 °C. The temperature dependences of the sensor sensitivity on the basis of the iron oxide film to detectable gases were determined. The possibilities for analyzing mixtures of gases with the use of a sensor array from two sensitive zones were shown. Based on the obtained data, the optimum temperatures of the sensing elements of the dual-zone sensor for selective detection of hydrogen and methane are 60 and 190 °C.

#### References

1. Arafat M. M., Dinan B., Akbar Sheikh A., Haseeb A. S. M. A. Gas sensors based on one dimensional nanostructured metal-oxides: a review, *Sensor*, 2012, vol. 12, pp. 7207–7258.

2. Larin A., Womble P. C., Dobrokhotov V. Hybrid  $SnO_2/TiO_2$  nanocomposites for selective detection of ultra-low hydrogen sulfide concentrations in complex backgrounds, *Sensors*, 2016, vol. 16, pp. 1373–1387.

3. **Rydosz A., Szkudlarek A.** Gas-sensing performance of M-doped CuO-based thin films working at different temperatures upon exposure to propane, *Sensors*, 2015, vol. 15, pp. 20069–20085.

4. Cattrall Robert W. Chemical sensors. Oxford: Oxford Univ. Press, 1997. 74 p.

5. **Drejzin, V. Je., Brezhneva E. O.** Sravnitel'nyj analiz harakteristik promyshlennyh gazochuvstvitel'nyh datchikov, *Datchiki i sistemy*, 2011, no. 3, pp. 68–78 (in Russian).

6. Presmanes L., Thimont Y., Chapelle A., Blanc F., Talhi C., Bonningue C., Barnabé A., Menini P., Tailhades P. Highly sensitive sputtered ZnO:Ga thin films integrated by a simple stencil mask process on microsensor platforms for sub-ppm acetaldehyde detection, *Sensors*, 2017, vol. 17, pp. 1055–1066.

7. Shaposhnik A., Zvyagin A. A., Vasiliev A., Ryabtsev S. V., Shaposhnik D., Nazarenko I. N., Buslov V. A. Opredelenie optimal'nyh temperaturnyh rezhimov raboty poluprovodnikovyh sensorov, *Sorbtsionnye i Khromatograficheskie Protsessy*, 2008, no. 3, pp. 501–506 (in Russian).

8. Sun Y.-F., Liu S.-B., Meng F. L., Liu J. Y., Jin Z., Kong L. T., Liu J. H. Metal oxide nanostructures and their gas sensing properties: a review, *Sensors*, 2012, vol. 12, pp. 2610–2631.

9. Pronin I., Averin I. A., Alexandrova O. A., Moshnikov V. A. Modificirovanie selektivnyh i gazochuvstvitel'nyh svojstv rezistivnyh adsorbcionnyh sensorov putem celenapravlennogo legirovanija, *Sensors & Systems*, 2013, no. 3, pp. 13–16 (in Russian).

10. Sysoev V. V., Musatov V. Ju. Gazoanaliticheskie pribory "elektronnyj nos". Saratov: Saratovskij gos. tehnicheskij un-t, 2011, 98 p (in Russian).

11. Lashkov A. V., Dobrohotov V. V., Sysoev V. V. Termokataliticheskij mul'tisensornyj chip, *Izvestiya SFedU. Engineering sciences*, 2014, no. 9, pp. 195–201 (in Russian).

12. Muhurov N. I., Efremov G. I., Kudanovich O. N. Ustrojstva mikromehaniki i mikrosensoriki na nanoporistom okside aljuminija, Minsk, Bestprint, 2005. 112 p (in Russian).

13. **Muhurov N. I., Denisjuk S. V., Kudanovich O. N.** Adsorbcionno-rezistivnyj gazovyj sensor, Pat. RB no. 10166, 17.03.2014 (in Russian).

14. **Dahlin A. B.** Size matters: problems and advantages associated with highly miniaturized sensors, *Sensors*, 2012, vol. 12 (3), pp. 3018–3036.

15. Gasenkova I. V., Muhurov N. I., Lynkou L. M., Jasin M. V. Threshold sensor control of ionizing radiations, *Doklady BGUIR*, 2013, no. 8 (78), pp. 108–111.

16. Muhurov N. I., Gasenkova I. V., Andruhovich I. M. Osobennosti formirovanija precizionnyh chuvstvitel'nyh jelementov datchikov kosmicheskoj plazmy, *Nano- and microsystemnaya teckhnika*, 2015, no. 1 (174), pp. 48–56 (in Russian).

17. **Gasenkova I. V., Ostapenko E. V.** Effect of Annealing on the Phase Composition and Morphology of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Formed in a Complex Electrolyte, *The Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques,* 2013, vol. 7, no. 3, pp. 536–541.

18. Mardilovich P. P., Govyadinov A. N., Mukhurov N. I., Rzhevskii A., Paterson R. New and modified anodic alumina membranes Part I. Thermotreatment of anodic alumina membranes, *Journal of Membrane Science*, 1995, vol. 98, is. 1–2, pp. 131–142.

19. Nefedov V. I. Rentgenojelektronnaja spektroskopija himicheskih soedinenij: spravochnik, Moscow, Izd-vo Himija, 1984, 256 p (in Russian).

20. Karpova S. S., Moshnikov V. A., Mjakin S. V., Kolovangina E. S. Funkcional'nyj sostav poverhnosti i sensornye svojstva ZnO,  $Fe_2O_3$  i Zn $Fe_2O_4$ , *Semiconductors*, 2013, vol. 47, is. 3, pp. 369–372 (in Russian).

21. Grosvenor A. P., Kobe B. A., Biesinger M. C., Mcintyre N. S. Investigation of multiplet splitting of Fe 2p XPS spectra and bonding in iron compounds, *Surface and interface analis*, 2004, vol. 36, pp. 1564–1574.

22. Karpova S. S., Moshnikov V. A., Maksimov A. I., Mjakin S. V., Kazanceva N. E. Issledovanie vlijanija kislotno-osnovnyh svojstv poverhnosti oksidov ZnO,  $Fe_2O_3$  i Zn $Fe_2O_4$  na ih gazochuvstviteľnosť po otnosheniju k param jetanola, *Semiconductors*, 2013, vol. 47, is. 8, pp. 1022–1026 (in Russian).

#### УДК 681.584.77; 621.318.51; 621.3.066.5

DOI: 10.17587/nmst.20.688-695

**Я. Б. Эннс,** аспирант, e-mail: pen.mems@gmail.com, **Е. Н. Пятышев,** канд. физ.-мат. наук, зав. лаб., **Ю. Д. Акульшин,** науч. сотр., СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург, 195251,

П. Б. Эннс, гл. технолог,

АО "СКТБ РТ", Великий Новгород

### БИСТАБИЛЬНОЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОЕ РЕЛЕ НА ОСНОВЕ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ НЕЛИНЕЙНЫХ УПРУГИХ СТРУКТУР

#### Поступила в редакцию 28.04.2018

Представлены результаты разработки бистабильного микромеханического привода для МЭМС-реле, изготовленного по объемной технологии микросистемной техники. Приведены теоретические и экспериментальные результаты, полученные в ходе математического моделирования и изготовления микрореле. Выполнен анализ влияния профиля аркообразной конструкции кремниевых балок и выработаны методы повышения устойчивости стабильных состояний. Предложен метод снижения управляющего напряжения, основанный на резонансном возбуждении привода при постоянном напряжении смещения.

**Ключевые слова:** бистабильное реле, потеря механической устойчивости, нелинейные упругие структуры, аркообразная балка, модуляция профиля, механическая устойчивость, электростатический привод, динамическое переключение, МЭМС

#### Введение

В последнее десятилетие получили широкое распространение в коммутационной технике микроэлектромеханические системы (МЭМС), в частности, электрические и оптические реле и переключатели. Преобладающее большинство электрических реле и переключателей изготовлено с применением поверхностной технологии микрообработки. Однако в последние годы большой интерес вызывают МЭМС-реле с латеральным движением. В подавляющем большинстве упругие подвесы микромеханической структуры являются линейными элементами, где линейность позволяет обеспечить легкое преобразование энергии. Однако все больший интерес вызывают нелинейные элементы жесткости. Активное внимание к нели-

нейным подвесам вызвано возможностью формирования мультистабильных систем. Особое внимание уделяется аркообразным подвесам, профиль которых определяется формой потери механической устойчивости. Нелинейность подобных подвесов обусловлена резким возрастанием аксиальной нагрузки при действующей на балку поперечной нагрузке [1]. Подобная структура имеет два минимума механической энергии, т.е. обладает двумя стабильными состояниями. Наличие нескольких энергетических минимумов механической системы обусловлено потерей устойчивости. Однако в подобных системах отмечают серьезную несимметричность точек бифуркации, т. е. значительную разницу в глубине потенциальных ям первого и второго устойчивых состояний [2]. Для увеличения устойчивости стабильных состояний применяют



**Рис. 1.** Фотография прототипа бистабильного микроэлектромеханического привода в открытом и закрытом состояниях *Fig. 1. Photo of a prototype of a bistable micromechanical drive in the open and closed states* 

методы локального ужесточения плеч аркообразного подвеса [3]. В представленной работе для этих целей предлагается использовать модуляцию толщины и оптимизацию исходного профиля аркообразного подвеса. Резонансная частота управляющего напряжения имеет амплитудно-зависимую характеристику. Для обеспечения эффективности переключения между стабильными состояниями могут быть применены динамические методы с переменным и постоянным напряжением. Однако для данных систем характерна сильная нелинейность, выраженная в зависимости резонансной частоты от амплитуды колебаний. Для решения задач оптимизации управляющего напряжения необходимо изучение динамического поведения аркообразных упругих элементов.

# 1. Конструкции и технологии изготовления нелинейного привода

Бистабильное реле представляет собой микроэлектромеханическую систему (рис. 1), предназначенную для энергоэффективной коммутации электрического сигнала. Непосредственно коммутация сигнала обеспечивается контактом подвижного и неподвижного кремниевых электродов (рис. 1). Для снижения сопротивления контакта поверхность чипа запыляется металлической пленкой. Перемещение электрода составляет примерно 38 мкм. Для улучшения характеристик прижимного контакта были сформированы точечные электроды площадью 0,001 мкм<sup>2</sup>, при этом сопротивление составило 2 Ом.

Микроэлектромеханическую систему привода изготовляют по объемной технологии микросистемной техники с использованием глубокого плазмохимического травления (ГПХТ). В качестве структурного слоя использован монокристаллический кремний, закрепленный на стеклянной подложке. Толщина структурного слоя составляет 90 мкм. Формирование металлической пленки осуществляют методами термического напыления.

Основным элементом бистабильной микромеханической системы привода является нелинейный упругий элемент подвеса — аркообразная балка, в которой наличие двух устойчивых положений обусловлено потерей механической устойчивости. Резкое увеличение аксиальной нагрузки при действии на балку поперечной нагрузки приводит к формированию двух минимумов механической энергии. Поперечная нагрузка формируется в центральной части аркообразной балки за счет присоединения гребенчатого привода. Для устранения несимметричных (вращательных) форм потери устойчивости упругий подвес выполнен из двух параллельно соединенных аркообразных балок. Для подобных аркообразных упругих элементов характерна небольшая глубина второй потенциальной ямы и несимметричность значений нагрузки точек бифуркации [2]. Для повышения механической устойчивости второго стабильного состояния были применены методы локального увеличения жесткости аркообразной балки, профиль балки имеет переменную по длине толщину (рис. 1). Данный метод позволяет существенно увеличить отношение между верхним и нижним уровнями механической энергии вблизи второго устойчивого состояния (рис. 2). При этом абсолютная величина верхнего уровня механической энергии имеет меньшую зависимость от толщины элементов [3].

Электродная система привода состоит из двух оппозитно направленных систем гребенчатых приводов и также имеет нелинейный характер. Профиль гребенчатых электродов также выполнен с переменной толщиной, что обеспечивает изменение зазора между поверхностями электродов при



Рис. 2. Зависимость потенциальной энергии *Ep* от перемещения актюатора  $d_{1/2}$ : *1* — однородная по толщине аркообразная балка; *2* — аркообразная балка с переменной по длине толщиной профиля

Fig. 2. Dependence of potential energy Ep on displacement of actuator  $d_{l/2}$ : 1 - homogeneous by thickness arch-shaped beam; 2 - arch-shaped beam with a variable by the length thickness of the profile

перемещении привода. Переменный зазор позволяет снизить уровень нагрузки после скачкообразного перехода, что уменьшает вероятность отскока при резком снятии напряжения, и упростить электрическую систему управления. Кроме того, переменный зазор обеспечивает лучшее проникновение травящих компонентов и отвод продуктов реакции при ГПХТ, что облегчает травление узких полостей при малом изменении удельной емкости привода [4].

#### 2. Экспериментальное исследование

Определение статических характеристик привода бистабильного реле. Для проведения экспериментального исследования бистабильного привода были изготовлены прототипы. Для измерения перемещения использовали как оптические, так и электрические методы с применением преобразователя емкость - напряжение, позволяющего фиксировать изменения емкости гребенчатой структуры привода при перемещении привода. При этом к одному массиву гребенчатого привода прикладывали постоянное напряжение, а на противоположном измеряли емкость. Перемещение актюатора и действующие силы реакции упругого подвеса показаны на рис. 3 (см. третью сторону обложки). Результаты эксперимента показали хорошую согласованность с аналитической зависимостью и численной моделью аркообразных упругих подвесов [3].

На рис. 3, *a*, изображена зависимость силы от перемещения для аркообразной балки с однород-

ной толщиной профиля, хорошо видна несимметричность относительно нуля значения силы переходов  $F_r$ . Применение переменного профиля балки позволило добиться увеличения симметрии характерных точек переходов и увеличить устойчивость второго стабильного состояния (рис. 3, *b*).

В ходе исследования была определена скорость переключения актюатора: 1,5 мс для открытия электрического канала (Up) и 2 мс для закрытия электрического канала (Down). При этом локальное увеличение жесткости упругого подвеса также сблизило время переключения: 1,25 мс для открытия электрического канала (Up) и 1,3 мс для закрытия электрического канала (Down). Переходные процессы также показаны на рис. 3 (см. третью сторону обложки).

Для данного нелинейного упругого подвеса ключевым фактором, влияющим на его поведение, является наличие внутренних напряжений. Были проведены исследования температурной чувствительности бистабильного реле, характерной для структур кремний-на-стекле. Измерения проводили в диапазоне температур 0...60 °C. Результаты измерений, представленные на рис. 4 (см. третью сторону обложки), хорошо соотносятся с расчетными результатами. На рис. 4, а, показано смещение упругого элемента при изменение температуры. При этом смещение уровня кривой обусловлено остаточными напряжениями после анодного соединения и составляет примерно 40 кПа. Изменение уровня внутренних напряжений приводит к отклонению параметров упругих элементов (рис. 4, *b*).

В ходе исследования была проверена стойкость бистабильного реле к механическим воздействиям. Так, система показала положительные результаты при нагрузке 100 g одинарного удара и синусоидальной переменной нагрузке в диапазоне 50...600 Гц.

Определение динамических характеристик привода бистабильного реле. Применение методов локального увеличения жесткости аркообразного подвеса приводит к увеличению нагрузки переключения привода и повышению напряжения управления. Для снижения управляющего напряжения могут быть применены динамические методы переключения [5]. При этом для управления приводом используется резонансное увеличение сигнала, возбужденного переменным напряжением с добавлением постоянного напряжения смещения. Система аркообразного упругого подвеса обладает квадратичной и кубической нелинейностями, т. е. амплитудно-зависимой резонансной частотой [6]. То есть смещение привода и изменение амплитуды колебаний приводит к изменению резонансной частоты. Таким образом можно проводить настройку частоты собственных колебаний.

Для определения частотной характеристики прототипы актюатора бистабильного реле были исследованы под действием переменной нагрузки. Возбуждение колебаний переменным напряжением без постоянного смещения позволяет добиться разделения механических колебаний от электрического сигнала возбуждения. Так, частота электрического сигнала возбуждения составляет половину частоты собственных колебаний привода.

Для обеспечения высокой добротности колебаний резонатор помещали в вакуумную камеру. Добротность определяли исходя из полосы пропускания АЧХ резонатора при разном давлении и малом напряжении возбуждения (от 1...0,05 В) (рис. 5). Значение напряжения возбуждения выбирали исходя из границ линейной области резонатора. При высокой амплитуде переменного напряжения (5...10 В) частотная зависимость имеет явно нелинейный характер (типа — *softing*) (рис. 6). Экспериментально полученные характеристики соответствуют теоретическим зависимостям.

Амплитудная и фазовая характеристики привода бистабильного реле при разном давлении и уменьшении частоты показаны на рис. 7 (см. четвертую сторону обложки). При этом срыв высокодобротных колебаний наступает при изменении фазы много меньше, чем 90°, и не зависит от амплитуды колебаний. Это объясняется повышением чувствительности колебаний к скорости изменения частоты переменного сигнала. При измерении частотного ответа резонатора с возбуждением колебаний переменным напряжением с постоянным смещением наблюдается наведение помех на измерительных электродах от электрического сигнала возбуждения. Полученные амплитудно-частотные характеристики показаны на рис. 8 (см. четвертую сторону обложки). При этом наблюдается смеще-



Рис. 5. Зависимость добротности колебаний резонатора Q от давления P

Fig. 5. Dependence of the quality factor of oscillations of resonator Q on pressure P



Рис. 6. Частотный ответ бистабильного привода с аркообразным подвесом при переменном напряжении  $U_{ac} = 5$  В: 1 -изменение частоты возбуждения в сторону низких частот; 2 -изменение частоты возбуждения в сторону высоких частот

Fig. 6. Frequency response of a bistable drive with the arch-shaped suspension at the alternating voltage  $U_{ac} = 5 V: 1$  — change of the frequency of excitation towards low frequencies; 2 — change of the frequency of excitation towards high frequencies

ние резонансной частоты в диапазоне 1,35 кГц при напряжении смещения  $U_{dc} = 45$  В.

Используя полученные частотные зависимости, можно существенно снизить напряжение управления при возбуждении колебаний переменным напряжением с постоянным смещением. Нелинейный характер колебаний резонатора позволяет возбуждать колебания с частотой, удаленной от частоты собственных колебаний в линейной области колебаний. Частота переменного напряжения определяется частотой, при которой происходит скачок амплитуды частотной зависимости для соответствующего напряжения смещения. При отсутствии напряжения смещения вынужденные колебания не приводят к значительному росту колебаний резонатора, как и напряжение смещения не приводит к его переключению. После скачкообразного перехода во второе устойчивое положение резонансные колебания затухают вследствие изменения резонансной частоты.

В ходе проведения исследования микромеханический резонатор возбуждался при атмосферном давлении напряжением на частоте 4,6 кГц и амплитудой  $U_{ac} = 10$  В. Добротность механического резонатора при этом составила 40. Приложение напряжения смещения в 50 В приводит к скачкообразному переходу и перемещению привода во второе устойчивое положение. Для снижения напряжения система резонатора была помещена в вакуум. Увеличение добротности, как видно из рис. 8, для нелинейных колебаний не приводит к существенному увеличению амплитуды, как для линейных систем. При добротности 8000 переход между ус-

тойчивыми состояниями обеспечивается при 35 В постоянного смещения и 5 В переменного напряжения.

#### Заключение

В ходе работы был разработан бистабильный микромеханический привод для МЭМС-реле, изготовленный по объемной технологии микросистемной техники. Проведен анализ влияния профиля аркообразной конструкции кремниевых балок и выработаны методы повышения устойчивости стабильных состояний. Теоретические данные подтверждаются проведенным экспериментальным исследованием переходных процессов переходов между устойчивыми состояниями. Предложен метод снижения управляющего напряжения, основанный на резонансном возбуждении привода с постоянным смещением. Представлены данные измерения динамических характеристик нелинейного резонатора при возбуждении переменным напряжением и возбуждении переменным напряжением со смещением при разных значениях добротности. Получены результаты, показывающие возможность снижения управляющего напряжения при использовании динамических методов переключения.

#### Список литературы

1. **Zhang Y., Y Wang., Li Z.** et al. Analytical method of predicating the instabilities of a micro arch-shaped beam under electrostatic loading // J. Microelectromech. Syst., 2007. Vol. 16, N. 6. P. 909–918.

2. Qiu J., Lang J. H., Slocum A. H. A curved-beam bistable mechanism // J. Microelectromech. Syst., 2004, Vol. 13, N. 2, April. P. 137–145.

3. Enns Y. B., Pyatishev E. N., Glukhovskoy A. Bistable arch-like beams with modulated profile as perspective supporting structures of a microelectromenchanical actuator // Journal of Physics: Conf. Series, 2017. Vol. 917 (082013). P. 1–5.

4. **Pyatishev E. N., Enns Ya. B., Kazakin A. N.** et al. MEMS GYRO comb-shaped drive with enlarged capacity gradient // 24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), 2017. P. 383–385.

5. Casals-Terre J., Fargas-Marques A., Shkel A. M. Snapaction bistable micromechanisms actuated by nonlinear resonance // J. Microelectromech. Syst. 2008. Vol. 17 (5). P. 1082–1093.

6. Ramini A. H., Hennawi Q. M., Younis M. I. Theoretical and Experimental Investigation of the Nonlinear Behavior of an Electrostatically Actuated In-Plane MEMS Arch // J. Microelectromech. Syst. 2016. Vol. 25, Is. 3. P. 1–9.

Ya. B. Enns, Postgraduate Student, pen.mems@gmail.com, E. N. Pyatishev, Ph. D, Yu. D. Akulshin, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, 195251, Russian Federation, P. B. Enns, "SKTB RT", Veliky Novgorod, 195251, Russian Federation

*Corresponding author:* **Enns Yakov B.,** Postgraduate Student, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, 173021, Russian Federation, pen.mems@gmail.com

# A Bistable Micromechanical Relay Based on Buckling of the Nonlinear Elastic Structures

Received on April 28, 2018 Accepted on May 19, 2018

This paper presents the results of development of a bistable micromechanical drive for a MEMS relay, manufactured with the use of the bulk technology. The principle of operation of the device is based on the buckling instability of a nonlinear elastic suspension. In this paper the authors present stages of manufacturing of the relay and the experimental results proved by the finite element analysis (FEA). The influence of the profile of an arch-shaped silicon beam on the stability of the stable states was studied, and the methods to improve it were developed. The analysis data were confirmed by a transient experiment, when the beam switching was between the stable states. The actuator performance dependence on its temperature was evaluated as well and the stability of the bistable relay was tested under an external mechanical load. A method for reduction of the control voltage amplitude was proposed. It is based on the drive excitation at the resonance frequency of the arch beam in conjunction with a constant load generated by a bias. The authors studied the dynamic characteristics of the nonlinear resonator under the AC excitation as well as under biased AC excitation for the resonators of various quality factors. Results of the experiment demonstrate clearly that the control voltage can be significantly reduced due to the use of the dynamic switching techniques.

**Keywords:** bistable relay, buckling, nonlinear elastic structures, arch-shaped beam, profile modulation, mechanical stability, electrostatic actuator, dynamic switching, MEMS

For citation:

Enns Ya. B., Pyatishev E. N., Akulshin Yu. D., Enns P. B. A Bistable Micromechanical Relay Based on Buckling of the Nonlinear Elastic Structures, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 11, pp. 688–695.

DOI: 10.17587/nmst.20.688-695

#### Introduction

Microelectromechanical systems (MEMS) are widely used in the switching technologies and in the electric and optical relays and switches, in particular. Most of the relays and switches are based on the surface technology of microprocessing. Of great interest are MEMS relays with a lateral movement. In overwhelming number of cases the elastic suspensions of a micromechanical structure are linear elements, where linearity allows us to ensure an easy transformation of energy. However, an increasing interest is attracted to the nonlinear elements of rigidity. The attention to the nonlinear suspensions is due to a possibility of formation of multistable systems. Special attention is devoted to the arch-shaped suspensions, the profile of which is determined by the form of the loss of the mechanical stability. The nonlinearity of such suspensions is due to a sharp increase of the axial load at a cross-section load operating on a beam [1]. Such a structure has two minima of the mechanical energy, i.e. it possesses two stable states. Presence of several energy minima of the mechanical system is caused by a loss of stability. However, such systems are characterized by a considerable asymmetry of the bifurcation points, i.e. there is a considerable difference in the depths of the potential wells of the first and second stability states [2]. In order to increase the stability of the stable states, the methods of local toughening of the shoulders of the arch-shaped suspension are applied [3]. In the presented work the authors propose to use for these purposes a modulation of the thickness and optimization of the initial profile of the arch-shaped suspension. The resonant frequency of the control voltage has an amplitude-dependent characteristic. In order to ensure an efficient switching between the stable states, the dynamic methods with variable and constant voltages can be applied. However, the given systems are characterized by a strong nonlinearity expressed in the dependence of the resonant frequency on the amplitude of the oscillations. A possible solution to the problems of optimization of the control voltage requires studying of the dynamic behavior of the archshaped elastic elements.

# **1.** Designs and technologies for manufacturing of a nonlinear drive

A bistable relay is a microelectromechanical system (fig. 1) intended for an energy-efficient switching of an electric signal. Directly switching of a signal is ensured by a contact of the mobile and silicon electrodes (fig. 1). For a decrease of the contact resistance the chip surface is dusted by a metal film. Displacement of the electrode equals roughly to 38  $\mu$ m. For improvement of the characteristics of the clamping contact, the dot electrodes

were formed with the area of 0.001  $\mu$ m<sup>2</sup>, at that, the resistance equaled to 2  $\Omega$ .

Microelectromechanical drive system is made by the bulk microsystem technology with the use of a deep plasma-chemical etching (DPCE). As the structural layer, a monocrystal silicon fixed on a glass substrate was used. Thickness of the structural layer was 90  $\mu$ m. Formation of a metal film was carried out by the methods of the thermal deposition.

The basic element of the bistable micromechanical drive system is a nonlinear elastic suspension element (arch-shaped beam), in which presence of two steady positions is due to a loss of the mechanical stability. A sharp increase of the axial load during action on a beam of a cross-section load leads to formation of two minima of the mechanical energy. A cross-section load is formed in the central part of the arch-shaped beam due to connection of a comb drive. For elimination of the asymmetrical (rotary) forms of the loss of stability, the elastic suspension is made of two arch-shaped beams connected in parallel to each other. Such archshaped elastic elements are characterized by a small depth of the second potential well and asymmetrical values of the load points of bifurcation [2]. For a better mechanical stability of the second stable state, the methods of a local increase of the rigidity of the archshaped beam were applied. The beam profile has a variable by length thickness (fig. 1). The given method allows us to increase essentially the correlation between the top and the bottom levels of the mechanical energy near the second stable state (fig. 2). At that, the absolute value of the top level of the mechanical energy has a smaller dependence on the thickness of the elements [3].

The electrode system of the drive consists of two oppositely directed systems of the comb drives and also has a nonlinear character. The profile of the comb electrodes is also made with variable thickness, which ensures variation of the gap between the surfaces of the electrodes during a displacement of the drive. The variable gap makes it possible to reduce the level of a load after an abrupt transition, which reduces the probability of a bounce in case of a voltage drop and allows to simplify the electric control system. Besides, the variable gap ensures a better penetration of the etching components and removal of the reaction products at DPCE, which facilitates etching of the narrow cavities at a small variation of the specific capacity of the drive [4].

#### 2. Experimental research

Determination of the static characteristics of the drive of the bistable relay. For an experimental research of the bistable drive, several prototypes were made. For measurement of the displacement, both optical and electric methods were used with application of the capacityvoltage converter, allowing to record variations of the capacity of the comb structure of the drive during a displacement of the drive. At that, to one mass of the comb drive a constant voltage was applied, while on the opposite one the capacity was measured. Movement of the actuator and the influencing forces of the reaction of the elastic suspension are shown in fig. 3 (see the 3<sup>rd</sup> side of cover). The results of the experiment demonstrated a good match with the analytical dependence and the numerical model of the arch-shaped elastic suspensions [3].

Fig. 3, a, presents the dependence of the force on the movement for the arch-shaped beam with a homogeneous thickness of the profile. The asymmetry in relation to the zero value of the force of transition is well visible. Application of a variable profile of the beam allowed to achieve an increase of the symmetry of the characteristic points of transitions and to increase the stability of the second stable state (fig. 3, b).

During the research, the speed of switching of the actuator was determined: 1.5 ms for opening of the electric channel (Up) and 2 ms for closing of the electric channel (Down). At that, the local increase of the rigidity of the elastic suspension also made the switching times closer: 1.25 ms for opening of the electric channel (Up) and 1.3 ms for closing of the electric channel (Down). The transient processes are also shown in fig. 3.

For the given nonlinear elastic suspension the key factor, influencing its behavior, is availability of the internal stresses. Research was done of the temperature sensitivity of a bistable relay, typical for the silicon-on-the grass structures. Measurements were done in the range of 0...60 °C. The results of the measurements presented in fig. 4 (see the  $3^{rd}$  side of cover) match well with the calculations. Fig. 4, *a*, presents a displacement of the elastic element during a temperature variation. At that, the displacement of the level of the curve is caused by the residual stresses after an anode connection and equals approximately to 40 kPa. Variation of the level of the parameters of the elastic elements (fig. 4, *b*).

During the research the resistance of the bistable relay to the mechanical influences was checked. Thus, the system demonstrated positive results at the load of 100 g of a single blow and a sinusoidal variable load in the range of 50...600 Hz.

Determination of the dynamic characteristics of the drive of a bistable relay. Application of the methods of a local increase of the rigidity of the arch-shaped suspension leads to an increase of the load of switching of the drive and an increase of the control voltage. Dynamic methods of switching can be applied in order to decrease the control voltage [5]. At that, for control of the drive a resonant increase of the signal excited by an alternating voltage with addition of constant bias volt-

age is used. The system of the arched-shaped elastic suspension possesses a quadratic and cubic nonlinearities, i.e. amplitude-dependent resonant frequency [6]. That is, a displacement of the drive and change of the amplitude of oscillations leads to a variation of the resonant frequency. Thus, it is possible to adjust the frequency of the own oscillations.

For determination of the frequency characteristic, the prototypes of the actuator of the bistable relay were investigated under the influence of a variable load. Excitation of oscillations by an alternating voltage without a fixed bias allows us to achieve separation of the mechanical oscillations from the electric signal of excitation. Thus, the frequency of the electric signal of excitation makes a half of the frequency of the own oscillations of the drive.

In order to ensure high quality factor of oscillations, a resonator was placed in a vacuum chamber. The quality factor was defined proceeding from the pass-band of AFC of the resonator at different pressures and small voltages of excitation (from 1...0.05 V) (fig. 5). The value of the voltage of excitation was selected proceeding from the boundaries of the linear area of the resonator. At a high amplitude of the alternating voltage (5...10 V) the frequency dependence had an obviously nonlinear dependence (softing) (fig. 6). The experimentally received characteristics corresponded to the theoretical dependences. The amplitude and phase characteristics of the drive of the bistable relay at different voltages and lower frequencies are shown in fig. 7 (see the 4<sup>th</sup> side of cover). At that, failure of the quality factor oscillations comes at a phase change considerably less, than 90° and does not depend on the amplitude of the oscillations. This is explained by an increase of the sensitivity of the oscillations to the speed of change of the frequency of a variable signal. During measurement of the frequency response of the resonator with excitation of oscillations by an alternating voltage with a fixed bias, we observed interferences on the measuring electrodes induced by the electric signal of excitation. The received amplitude-frequency characteristics are presented in fig. 8 (see the 4<sup>th</sup> side of cover). At that, a displacement of the resonant frequency in the range of 1.35 kHz at the bias voltage  $U_{dc} = 45$  V was observed.

By using the obtained frequency dependencies it is possible to lower the control voltage during excitation of oscillations by an alternating voltage with a fixed bias. Nonlinear character of the oscillations of the resonator allows us to excite oscillations with the frequency far from the frequency of the own oscillations in the linear area of the oscillations. The frequency of the alternating voltage is determined by the frequency, at which there is a jump of the amplitude of frequency dependence for the corresponding bias voltage. In absence of the bias voltage the forced oscillations do not lead to a considerable growth of the oscillations of the resonator, just like the bias voltage does not lead to its switching. After a spasmodic transition into the second stable state the resonant oscillations fade due to variation of the resonant frequency.

During the research, the micromechanical resonator was excited at the atmospheric pressure by voltage on frequency of 4.6 kHz and the amplitude of  $U_{ac} = 10$  V. At that, the quality factor of the mechanical resonator was 40. Application of the bias voltage of 50 V led to a spasmodic transition and movement of the drive to the second stable position. For reduction of the voltage, the resonator system was placed in vacuum. As it is visible in fig. 8, for the nonlinear oscillations an increase of the quality factor does not lead to an essential increase of the amplitude, like for the linear systems. At the quality factor of 8000 the transition between the stable states is ensured at 35 V of the fixed bias and 5 V of the alternating voltage.

#### Conclusion

During the work a bistable micromechanical drive for MEMS relay was developed, made by the bulk microsystem technology. An analysis was done of the influence of the profile of the arch-shaped designs of the silicon beams and methods were developed for an increase of stability of the stable states. The theoretical data were proved by the undertaken experimental research of the transient processes of transition between the stable states. A method was proposed for reduction of the control voltage, based on the resonant excitation of the drive with a fixed bias. The measurements were presented of the dynamic characteristics of the nonlinear resonator during excitation by an alternating voltage and excitation by an alternating voltage with a displacement at different values of the quality factor. The results were received demonstrating a possibility of a decrease of the control voltage due to the use of the dynamic methods of switching.

#### References

1. Zhang Y., Wang Y., Li Z. Analytical method of predicating the instabilities of a micro arch-shaped beam under electrostatic loading, *J. Microelectromech. Syst.*, 2010, vol. 16, no. 6, pp. 909–918.

2. Qiu J., Lang J. H., Slocum A. H. A curved-beam bistable mechanism, *J. Microelectromech. Syst.*, 2004, vol. 13, no. 2, pp. 137–145.

3. Enns Y. B., Pyatishev E. N., Glukhovskoy A. Bistable arch-like beams with modulated profile as perspective supporting structures of a microelectromenchanical actuator, *Journal of Physics: Conf. Series*, 2017, vol. 917 (082013), pp. 1–5.

4. Pyatishev E. N., Enns Ya. B., Kazakin A. N. MEMS GYRO comb-shaped drive with enlarged capacity gradient, *Proc.* of 24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), 2017, pp. 383–385.

5. **Casals-Terre J., Fargas-Marques A., Shkel A. M.** Snapaction bistable micromechanisms actuated by nonlinear resonance, *J. Microelectromech. Syst.*, 2008, vol. 17 (5), pp. 1082–1093.

6. Ramini A. H., Hennawi Q. M., Younis M. I. Theoretical and Experimental Investigation of the Nonlinear Behavior of an Electrostatically Actuated In-Plane MEMS Arch, *J. Microelectromech. Syst.*, 2016, vol. 25, is. 3, pp. 1–9.

УДК 621.396.6: 621.3.049.77

#### DOI: 10.17587/nmst.20.695-703

**В. В. Шубин,** канд. техн. наук, доц., e-mail: shubin@nzpp.ru, Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

### БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ КМОП-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ УРОВНЯ НАПРЯЖЕНИЯ

#### Поступила в редакцию 20.06.2018

Представлен новый быстродействующий КМОП-преобразователь уровня напряжения. В предложенном преобразователе уровня напряжения использован оригинальный метод формирования цепи низкой проводимости для минимизации эффекта противодействия переходного процесса по перезаряду выходных емкостей триггера, для уменьшения задержки переключения и динамического тока потребления. Предложенный быстродействующий КМОП-преобразователь уровня напряжения содержит равноценные прямой и инверсный выходные инверторы, выполняющие не только усилительную функцию, но и функцию по организации предварительной установки в сети подтяжки вверх проводимости. Результаты моделирования предложенного КМОП-преобразователя уровня показывают, что задержки переключения были значительно уменьшены, приблизительно на 31 %. Кроме того, предложенный преобразователь работает в более широком диапазоне рабочих уровней напряжения по сравнению с традиционными исполнениями.

**Ключевые слова:** ИС, КМОП, проектирование, схемотехника, преобразователь уровня напряжения, быстродействие, качество, надежность

#### Введение

Развитие современных электронных систем требует применения самых разнообразных преобразователей уровня напряжения по целому ряду причин, среди которых наиболее существенные следующие:

- необходимость сопряжения элементов электронных систем и (или) устройств с несколькими источниками питания;
- необходимость согласования схем, имеющих различные уровни напряжений источников питания и внутренних сигналов;
- наличие в системах режима ожидания (*standby*) [1];
- для схем-ESD защиты [2, 3];
- для организации F-N-туннелирования (квантово-механический эффект туннелирования по Фаулеру—Нордхейму) в режиме стирания информации ячейки памяти флэш-памяти [4, 5];
- для снижения мощности потребления в системах с несколькими пороговыми напряжениями МОП транзисторов и т. д.

Классификация современных преобразователей уровня весьма сложна и сильно разветвлена [6—8] как по функциональным, так и по конструктивно-технологическим признакам. Поэтому в данной работе рассматриваются только классические преобразователи уровня, изготовленные по КМОП-



(комплементарная структура метал—оксид—полупроводник) технологии.

В этой работе представлен новый оригинальный КМОП-преобразователь уровня входного сигнала низкого уровня в сигнал высокого уровня (снизу вверх) с двумя источниками питания и равноценными прямым и инверсным выходными инверторами. Также описывается оригинальный метод формирования низкопроводящей цепи, не оказывающий влияния на снижение динамических характеристик предложенного преобразователя уровня.

# 1. Традиционный КМОП-преобразователь уровня напряжения

Чаще всего схемой *Традиционного КМОП-преобразователя уровня напряжения* называют 10-транзисторную схему (рис. 1) [9–13].

Данный КМОП-преобразователь уровня напряжения содержит три функционально независимых блока:

- Формирователь прямого и инверсного входных сигналов низкой амплитуды (GND/VddL);
- Преобразователь входного сигнала низкой амплитуды (GND/VddL) в сигнал высокой амплитуды (GND/VddH);
- Выходной буфер прямого сигнала высокой амплитуды (GND/VddH).

Формирователь прямого и инверсного входных сигналов низкой амплитуды (GND/VddL) построен на двух последовательно включенных КМОП-инверторах. Выход первого инвертора на транзисторах Р1-N1 является выходом инверсного сигнала, а выход второго инвертора на транзисторах P2—N2 — прямого. Иногда в качестве Формирователя прямого и инверсного входных сигналов низкой амплитуды (GND/VddL) используют один инвертор. В этом случае вход инвертора является источником прямого сигнала, а выход — инверсного сигнала [14]. Преобразователь входного сигнала низкой амплитуды (GND/VddL) сигнал высокой амплитуды в (GND/VddH) представляет собой триггер, состоящий из двух "полузащелок" на транзисторах Р3-N3 и P4—N4, запитанных от источника питания с высокой амплитудой (GND/VddH). Выходной буфер сигнала высокой амплитуды (GND/VddH) построен на транзисторах Р5-N5.

Рис. 1. 10-транзисторная схема Традиционного КМОП-преобразователя уровня напряжения Fig. 1. 10-transistor circuit of the convectonal High-Speed CMOS Level Voltage Converter



**Рис. 2.** Схема предложенного КМОП-преобразователя уровня напряжения Fig. 2. Circuit of the proposed High-Speed CMOS Level Voltage Converter

Для обеспечения устойчивой работы Традиционного КМОП-преобразователя уровня напряжения необходимо смещение передаточных характеристик вниз в двух "полузащелках" триггера Преобразователя входного сигнала низкой амплитуды (GND/VddL) в сигнал высокой амплитуды (GND/VddH). Данное условие достигается существенным уменьшением проводимости цепи сети подтяжки вверх на транзисторах РЗ, Р4 по сравнению с проводимостью сети подтяжки вниз на транзисторах N3, N4. Таким образом, время переходного процесса при переключении сигнала на входе выходного буфера из низкого уровня напряжения GND в напряжение высокого уровня VddH существенно больше по сравнению со временем переходного процесса при переключении сигнала из высокого уровня напряжения в низкий. Такая особенность приводит к увеличению времени переключения при формировании сигнала высокого уровня VddH на входе выходного буфера и, следовательно, к увеличению задержки времени распространения выходного сигнала низкого уровня GND на выходе OUT Традиционного КМОП-преобразователя уровня напряжения. Кроме того, вследствие повышенного времени переходного процесса увеличивается динамический ток потребления [12, 15, 16]. Поэтому основные усилия разработчиков электронных систем по усовершенствованию преобразователей уровня напряжения направлены на борьбу с этими недостатками. Далее представлено одно из таких оригинальных решений.

#### 2. Новый быстродействующий КМОП-преобразователь уровня напряжения

На рис. 2 представлена схема Нового (оригинального) быстродействующего КМОП-преобразователя уровня напряжения [17]. Как видно из рис. 2, предложенный КМОП-преобразователь уровня напряжения отличается от традиционного организацией сети подтяжки вверх триггера Преобразователя входного сигнала низкой амплитуды (GND/VddL) в сигнал высокой амплитуды (GND/VddH). Кроме того, на выходе соответствующей "полузащелки" в схему введен дополнительный инвертор на транзисторах Р10 и N10, выполняющий функцию выходного буфера инверсного сигнала OUTN высокой амплитуды (GND/VddH).

Выходные буферы прямого и инверсного сигналов высокой амплитуды (GND/VddH), помимо ос-

новной функции усиления выходных сигналов при работе на большую емкостную нагрузку, также выполняют дополнительную функцию формирования сигналов обратной связи для управления цепями высокой проводимости в сети подтяжки вверх.

Транзисторы РЗ, Р4, Р6 и Р9 выполнены с минимальной длиной канала (затвора) L и с большой шириной канала (затвора) W, поэтому они обладают высокой крутизной и образуют две цепи высокой проводимости — Рб, РЗ и Р9, Р4. Кроме того, так как транзисторы Р7 и Р8 выполнены с минимальной шириной канала (затвора) W и с большой длиной канала (затвора) L, то они имеют малую крутизну и совместно с транзисторами РЗ и Р4 образуют цепи низкой проводимости. Так как затворы транзисторов Р7 и Р8 подсоединены к шине источника питания низкого уровня напряжения GND, емкость затвор/подложка не влияет на быстродействие работы схемы в любом режиме. В то же время, чем больше длина канала (затвора) L транзисторов Р7 и Р8, тем меньше их крутизна и тем ниже суммарная проводимость цепей низкой проводимости Р7, Р3 и Р8, Р4. Вместе с тем, чем ниже эта проводимость, тем меньше время переключения триггера Преобразователя входного сигнала низкой амплитуды (GND/VddL) в сигнал высокой амплитуды (GND/VddH), так как мощным N-канальным транзисторам N3 и N4 легче преодолевать противодействие слабых цепей сетей подтяжки вверх защелки на транзисторах Р7, Р3 и Р8, Р4. Поэтому чем больше длина канала (затвора) L транзисторов Р7 и Р8, тем выше общее быстродействие схемы и тем меньше ее динамическая мощность потребления, а выбор длины канала (затвора) *L* может определяться на основании только топологической целесообразности.

#### 3. Результаты сравнения

Выбор принципов сравнения двух функционально одинаковых схем является довольно сложной задачей, так как их трудно привести к равным условиям. Чаще всего для сравнения цифровых схем используют результаты моделирования схем с минимальными размерами транзисторов *P*- и *N*-типа. Однако, несмотря на то что преобразователи уровня чаще всего относят к цифровым схемам в силу функциональных особенностей, такой метод не подходит для сравнения преобразователей уровня напряжения, так как для обеспечения устойчивой работоспособности в традиционной схеме требуется существенный перекос передаточных характеристик триггера.

Второй, часто используемый метод для сравнения преобразователей уровня напряжения — метод сравнения результатов моделирования схем, предварительно максимально оптимизированных на работу в одинаковых условиях: одинаковом входном сигнале и одинаковой выходной нагрузке. Однако и этот метод не дает полностью достоверного результата, так как не существует возможности утверждать, что какой-либо вариант достиг идеальной оптимизации. Всегда существуют варианты, которые могут опровергнуть достигнутые показатели. Кроме того, сама процедура поиска может занимать неопределенно большое количество времени. Поэтому для получения более точных результатов нужно применить некоторые другие подходы. Перед началом оптимизации необходимо



Рис. 3. Графики результатов моделирования наглядно демонстрируют превосходство ППУН над ТПУН

принять соглашение о перечисленных ниже принципах, на основании которых проводилось сравнение в данном исследовании.

1. Минимальная длина каналов (*L*) транзисторов *P*- и *N*-типа для обеих сравниваемых конструкций равна минимально допустимому размеру выбранного технологического процесса.

2. Ширину затворов (*W*) транзисторов инверторов *Формирователя прямого и инверсного сигналов* и *Выходного буфера прямого сигнала высокой амплитуды (GND/VddH)* выбирают из соображений согласования сопротивления. Смысл этого выбора заключается в создании инвертора с симметричной передаточной функцией, обеспечивающей равные задержки распространения сигналов при изменении уровня сигнала на входе от высокого к низкому и от низкого к высокому [18].

3. Электрическая схема, размеры транзисторов Формирователя прямого и инверсного сигналов, Выходного буфера прямого сигнала высокой амплитуды (GND/VddH) и N-канальных транзисторов Преобразователя входного сигнала низкой амплитуды (GND/VddL) в сигнал высокой амплитуды (GND/VddH) для сравниваемых конструкций полностью идентичны между собой.

4. Оптимизация схемы заключается в подборе размеров (W и L) *P*-канальных транзисторов *Преобразователя входного сигнала низкой амплитуды* (GND/VddL) в сигнал высокой амплитуды (GND/VddH), обеспечивающих максимальное быстродействие [19, 20].

5. Критерием сравнения является быстродействие по результатам моделирования при равной емкостной нагрузке.

Условия расчета переходного процесса для сравнения *Традиционного преобразователя уровня* напряжения с *Предложенным преобразователем* по динамическим параметрам:

 преобразование напряжения входного сигнала (Uinput) амплитудой от 0 до 3 В в выходной (Uoutput) — амплитудой от 0 до 10 В;

#### Численные значения временных задержек и превосходство ППУН над ТПУН

Numerical values of the time delays and advantage of PVLC over CVLC

Параметр быстродействия Speed parameter	ТПУН <i>CVLC</i>	ППУН PVLC	Превосходство ППУН над ТПУН по быстродействию, % Speed advantage of PVLC over CVLC, %
<i>t<sub>PLH</sub></i> , ns	14,280	9,754	31,695
<i>t<sub>PHL</sub></i> , ns	13,003	8,957	31,116
$t_R$ , ns	9,160	9,046	1,245
<i>t<sub>F</sub></i> , ns	6,072	6,033	0,642



**Рис. 4.** Графическое представление контролируемых параметров *Fig. 4. Graphic presentation of the controllable parameters* 

- длительность прямого  $(t_R)$  и обратного  $(t_F)$  фронта входного сигнала 6 нс;
- выходная емкость нагрузки ( $C_L$ ) 20 п $\Phi$ .

Численные значения результатов моделирования получены с помощью программы PSpice, из пакета OrCAD 9.2 ф. Cadence с использованием математической модели 3-го уровня и данными CMOS-технологического процесса 3 мкм. Расчеты проведены в режиме временного анализа по постоянному току (DC-анализ) Transient.

На рис. 3 представлены результаты моделирования, которые наглядно показывают превосходство Предложенного преобразователя уровня напряжения (ППУН) над Традиционным преобразователем уровня напряжения (ТПУН) по быстродействию.

В таблице приведены численные значения временных задержек и их сравнение в процентах.

Измерения проводили при VddL = 3 B, VddH = 10 B, длительности положительного и отрицательного фронтов входного сигнала  $t_{R, F(input)} = 6$  нс, емкости нагрузки  $C_L = 20 \text{ пФ}$ , а измерения задержки преобразования — от 0,5 значения амплитуды напряжения входного сигнала до 0,5 значения амплитуды напряжения выходного сигнала и длительности положительного и отрицательного фронтов выходного сигнала  $t_{R, F(output)}$  от 0,1 до 0,9 значения уровня амплитуды выходного сигнала, как показано на рис. 4.

#### Заключение

В работе представлен новый быстродействующий КМОП-преобразователь уровня напряжения и его принципиальная электрическая схема. Кроме того, описан оригинальный метод формирования цепи низкой проводимости, используемый в предложенном преобразователе уровня напряжения для минимизации эффекта противодействия переходного процесса по перезаряду выходных емкостей триггера, для уменьшения задержки переключения и динамического тока потребления. Предложенный быстродействующий КМОП-преобразователь уровня напряжения содержит равноценные прямой и инверсный выходные инверторы, выполняющие не только усилительную функцию, но и функцию по организации предварительной установки в сети подтяжки вверх высокой проводимости. Результаты моделирования предложенного КМОП-преобразователя уровня показывают, что задержки переключения были значительно уменьшены, приблизительно на 31 %. Кроме того, предложенный преобразователь работает в более широком диапазоне рабочих уровней напряжения по сравнению с традиционными исполнениями.

#### Список литературы

1. Shibata N., Kiya H., Kurita S., et al. A 0.5-V 25-MHz 1-mW 256-Kb MTCMOS/SOI SRAM for solar-power-operated portable personal digital equipment — Sure write operation by using step-down negatively overdriven bitline scheme // IEEE J. Solid-State Circuits. Mar. 2006.Vol. 41, N. 3. P. 728–742.

2. **Ker M.-D., Hsu K.-C.** Overview of on-chip electrostatic discharge protection design with SCR-based devices in CMOS intergrated circuit // IEEE Trans. Device Mater. Reliabil. Jun. 2005.Vol. 5, N. 2. P. 235–249.

3. Адамов Ю. Ф., Балака Е. С., Исаева Т. Ю. и др. Распределенная система защиты КМОП-микросхем от электростатических разрядов // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19, № 1. С. 60—64.

4. Tilke A. T., Pescini L., Bauer M., Stiftinger M. et al. Highly Scalable Embedded Flash Memory with Deep Trench Isolation and Novel Buried Bitline Integration for the 90-nm Node and Beyond // IEEE trans. Electron Devices. Jul. 2007. Vol. 54, N. 7. P. 1681–1688.

5. Otsuka N., Horowitz M. Circuit techniques for 1.5 V power supply flash memory // IEEE J. Solid-State Circuits. Aug. 1997. Vol. 32, N. 8. P. 1217–1230.

6. Kursun Volkan, Friedman Edy G. Multi-voltage CMOS Circuit Design // John Wiley & Sons, Ltd. August 2006. 242 p.

7. Гельман М. В., Дудкин М. М., Преображенский К. А. Преобразовательная техника // Челябинск: изд. ц. ЮУрГУ. 2009. 464 с.

8. Бурков А. Т. Электронная техника и преобразователи: учеб. для вузов. М.: Транспорт. 1999. 425 с.

9. Tan S. C., Sun X. W. Low power CMOS level shifters by bootstrapping technique // Electron. Letter. 2002. Vol. 38, N. 16. P. 876–878.

10. **Chavan A., MacDonald E.** Ultra low voltage level shifters to interface sub and super threshold reconfigurable logic cells // IEEE Aerospace Conference. Big Sky, Montana. 2008. P. 1–6.

11. Koo Kyoung-Hoi, Seo Jin-Ho, Ko Myeong-Lyong et al. A new level-up shifter for high speed and wide range interface in ultra deep sub-micron // IEEE International Symposium on Circuits and Systems. 2005. Vol. 2. P. 1063–1065.

12. **Kumar M., Arya S. K., Pandey S.** Level Shifter Design for Low Power Applications // International journal of computer science & information Technology. Oct. 2010. Vol. 2, N. 5. P. 124–132.

13. **Zhang Bo, Liang Liping, Wang Xingjun.** A new level shifter with low power in multi-voltage system // IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology, Shanghai. 2006. P. 1857–1859.

14. **Gupta Sh., Kumar M.** CMOS Voltage Level-Up Shifter — A Review // International Journal of Advances in Engineering Sciences. 2013. Vol. 3, N. 3.

15. **Shubin V. V.** Novoe shemotehnicheskoe reshenie odnorazrjadnogo polnogo KMOP summatora // Mikrojelektronika. 2011. Vol. 40, N. 2. P. 130–139.

16. **Baker J. R.** CMOS. Circuit Design, Layout, and Simultion.  $2^{\text{th}}$  ed. Published by Wiley — IEEE Press. 2005. 1139 p.

17. Патент РФ № 2604054. Преобразователь уровня напряжения / Шубин В. В. // Бюл. № 34 от 10.12.2016. 8 с.

18. **Rabaey J. M., Chandrakasan A., Nikolic B.** Digital Integrated Circuits: A Design Perspective. 2<sup>nd</sup> ed. NJ: Prentice Hall. Englewood Cliffs, 2002. 491 p.

19. **Wayne W.** Modern VLSI Design: System-on-Chip // Third Ed. Pearson Education, Inc., Prentice Hall, 2002. 618 p.

20. **Kaeslin H.** Digital Integrated Circuit Design. From VLSI Architectures to CMOS Fabrication. New York: Cambridge University Press, 2008. 845 p.

#### V. V. Shubin, Ph. D., Associate Professor, e-mail: shubin@nzpp.ru,

Novosibirsk State Technical University, Department of Semiconductor Devices and Microelectronics, Novosibirsk, 630082, Russian Federation

Corresponding author:

Shubin Vladimir V., Ph. D., Associate Professor, Novosibirsk State Technical University, Department of Semiconductor Devices and Microelectronics, Novosibirsk, 630082, Russian Federation, e-mail: shubin@nzpp.ru

### High-Speed CMOS Voltage Level Converter

Received on June 20, 2018 Accepted on July 30, 2018

The author presents a novel high-speed CMOS voltage level converter. In order to reduce the switching delay and the dynamic current consumption, the proposed voltage level converter uses an original method for formation of a low conductivity network, minimizing the effect of counteraction of the transient process. Besides, the proposed converter contains equivalent direct and inverse output inverters, which perform an amplifying function, as well the function of organization of pre-setup in the pull-up network of high conductivity. The author performed a simulation using data of  $12 V 3 \mu m$  standard CMOS process. The results of the simulation of the proposed converter demonstrated that the switching delay was reduced significantly, roughly by 31 %. Moreover, the proposed voltage level converter works in a wider range of the operating voltage levels in comparison with the traditional applications.

Keywords: IC, CMOS, design, schematics, voltage level converter, high-speed, quality, reliability

For citation:

Shubin V. V. High-Speed CMOS Voltage Level Converter, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 11, pp. 695–703.

DOI: 10.17587/nmst.20.695-703

#### Introduction

Development of electronic systems demands application of the most diversified high-speed CMOS voltage level converter for a number of reasons, among which the most essential are the following:

- Necessity of interface of the elements of the electronic systems and (or) devices with several power supplies;
- Necessity of coordination of the circuits having various levels of voltages and internal signals;
- Availability of the expectation (standby) mode in the systems) [1];
- ESD protection in the circuits [2, 3];
- For organization of F-N tunneling (quantum-mechanical effect of Fowler-Nordheim tunneling) in the mode of deleting of information in the memory cell of the flash memory [4, 5];
- For decrease of the power of consumption in the systems with several threshold voltages of MOS transistors, etc.

Classification of the level converters is rather complex and widely ramified [6-8] both by the functional, and the design-technological signs. Therefore, the given work presents only the classical level converters made by CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor structure) technologies.

The work presents a new original CMOS level converter of the input signal of a low level into a signal of high level (from below-upwards) with two power supplies and equivalent direct and inverse output inverters. It also describes an original method for formation of a low-conducting circuit, not rendering any influence on a decrease of the dynamic characteristics of the proposed level converter.

# 1. Conventional high- speed CMOS voltage level converter

The 10 transistor circuit is most frequently called the *conventional high- speed CMOS voltage level converter* (fig. 1) [9–13].

The given contains three functionally independent units:

- Shaper of the direct and inverse input signals of low amplitude (GND/VddL);
- Converter of the input signal of low amplitude (GND/VddL) into a signal of high amplitude (GND/VddH);
- Output buffer of a direct signal of a high amplitude (GND/VddH).

The Shaper of the direct and inverse input signals of low amplitude (GND/VddL) is constructed of two inseries connected CMOS inverters. The output of the first inverter on P1–N1 transistors is the output of the inverse signal, while the output of the second inverter on P2-N2 transistors - of the direct one. Sometimes, the role of the Shaper of the direct and inverse input signals of low amplitude (GND/VddL) is played by one inverter. In this case the inverter input is the source of the direct signal, and the output - of the inverse signal [14]. A converter of an input signal of low amplitude (GND/VddL) into a signal of high amplitude (GND/VddH) is a trigger consisting of two "semilatches" on P3-N3 and P4-N4 transistors, getting power from the power supply with high amplitude (GND/VddH). The output buffer of the signal of high amplitude (GND/VddH) is constructed on P5–N5 transistors.

In order to ensure a stable operation of the conventional high-speed CMOS voltage level converter it is necessary to shift the transmission characteristics down in two "semilatches" of the trigger of the converter of the input signal of low amplitude (GND/VddL) into a signal of high amplitude (GND/VddH). The given condition is reached due to an essential reduction of the conductivity of the circuit of the network of tightening upwards on transistors P3, P4 in comparison with the conductivity of the network of tightening downwards on transistors N3, N4. Thus, the time of the transient process during the signal switching at the input of the output buffer from the low voltage level GND into the voltage of high level VddH is considerably more in comparison with the time of the transient process during switching of a signal from a high voltage level into the low one. Such a specific feature leads to an increase of the time of switching during formation of a high level signal VddH at the input of the output buffer and, hence, to an increase of the time delay of propagation of the output signal of the low level GND at the output OUT of the conventional high- speed CMOS voltage level converter. Besides, because of a longer time of the transient process, the dynamic current of consumption increases [12, 15, 16]. Therefore, the basic efforts of the developers of the electronic systems for improvement of the voltage level converters are concentrated on the struggle with these drawbacks. One of such original solutions is presented below.

#### 2. New high-speed CMOS voltage level converter

Fig. 2 presents the circuit of a *new (original) high-speed CMOS voltage level converter* [17]. As is visible in fig. 2, the proposed CMOS converter of the voltage

level is different from the traditional one by organization of the network of tightening upwards of the trigger of the Converter of the input signal of low amplitude (GND/VddL) into the signal of high amplitude (GND/VddH). Besides, at the output of the corresponding "semilatch" an additional inverter on transistors P10 and N10 is introduced into the circuit, carrying out the function of the output buffer of the inverter signal OUTN of high amplitude (GND/VddH).

The output buffers of the direct and inverse signals of high amplitude (GND/VddH), besides their basic function of amplifying of the output signals during operation on a big capacitor load, also carry out an additional function of formation of the feedback signals for control of the circuits of high conductivity in the network of tightening upwards.

Transistors P3, P4, P6 and P9 are made with the minimal length of the channel (gate) L and with a big width of the channel (gate) W, therefore they have a high steepness and form two circuits of high conductivity – P6, P3 and P9, P4. Besides, since transistors P7 and P8 are made with the minimal width of the channel (gate) W and with a big length of the channel (gate) L, they have a small steepness and together with transistors R3 and P4 form the circuits of low conductivity. Since the gates of transistors P7 and P8 are connected to the bus of the power supply of a low voltage level GND, the gate/substrate capacity does not influence the speed of operation of the circuit in any mode. At the same time, the more is the length of the channel (gate) L of transistors P7 and P8, the less is their steepness, and the lower is the total conductivity of the circuits of low conductivity P7, P3 and P8, P4. At the same time, the lower is this conductivity, the less is the time of switching of the trigger of the Converter of the input signal of low amplitude (GND/VddL) into the signal of high amplitude (GND/VddH), because for the powerful N-channel transistors N3 and N4 it is easier to overcome the counteraction of the weak circuits of the networks of tightening upwards of latches on transistors P7, P3 and P8, P4. Therefore, the longer is the length of the channel (gate) L of transistors P7 and P8, the higher is the general speed of the circuit and the less is its dynamic power consumption, while the choice of the length of a channel (gate) L can be determined on the basis of only topological expediency.

#### 3. Results of comparison

Selection of the principles for comparison of two functionally identical circuits is a rather complex task, because it is difficult to set equal conditions for them. More often for comparison of the digital circuits the results of modeling of the circuits with the minimal sizes of transistors of P- and N-type are used. However, notwithstanding the fact that most frequently the level converters are considered as digital circuits, owing to the functional features, such a method is no good for comparison of the voltage level converters, because in order to ensure a steady workability in a traditional circuit, an essential warp of the transfer characteristics of the trigger is required.

The second frequently used method for comparison of the voltage level converters is the method for comparison of the results of modeling of the circuits, preliminary as much as possible optimized for the work in the identical conditions: at an identical input signal and identical output load. However, this method also does not ensure a completely authentic result, because there is no possibility to assert, that any version has reached the ideal optimization.

Always there are versions, which can disprove the achieved indexes. Besides, the procedure of search itself may require an indefinitely considerable quantity of time. Therefore, in order to obtain more accurate results it is necessary to apply some other approaches. Before the optimization it is necessary to adopt an agreement on the principles listed below, on the basis of which the comparison was done in the given research.

1. The minimal length of channels (L) of transistors of P — and N-type for both compared designs is equal to the minimum admissible size of the selected technological process.

2. The width of the gates (W) of the transistors for the inverters of the Shaper of direct and inverse signals and the Output buffer of the direct signal of high amplitude (GND/VddH) are selected proceeding from considerations of coordination of the resistance. The essence of this choice in the development of an inverter with a symmetric transfer function, ensuring equal delays of propagation of signals in case of variation of the signal on the input from a high to a low and from a low to a high level [18].

3. The electric circuit, the sizes of the transistors of the *Shaper of the direct and inverse signals*, the *Output buffer of the direct signal of high amplitude* (GND/VddH) and N-channel transistors of the *Converter of the input signal of low amplitude* (GND/VddL) into a signal of high amplitude (GND/VddH) for the compared designs are completely identical among themselves.

4. Circuit optimization consists in selection of the sizes (*W* and *L*) of P-channel transistors of the *Converter of the input signal of low amplitude* (GND/VddL) into a signal of high amplitude (GND/VddH), ensuring the maximal speed [19, 20].

5. The criterion for comparison is the high speed by the results of modeling at equal capacitor loads.

The conditions for calculation of the transient process for comparison of the *conventional high-speed CMOS voltage level converter* with the *Proposed converter* by the dynamic parameters:

- Transformation of voltage of the input signal (Uinput) with the amplitude from 0 up to 3 V into the output (Uoutput) one with the amplitude from 0 up to 10 V;
- Duration of the direct  $(t_R)$  and  $(t_F)$  indirect fronts of the input signal is 6 ns;
- Output capacity of load (C<sub>I</sub>) is 20 pF.

The numerical values of the results of simulation were received by means of PSpice software, from Or-CAD 9.2 f. Cadence package with the use of a mathematical model of the 3rd level and data of 3  $\mu$ m CMOS technological process. Calculations were done in the mode of "Transient" direct current time analysis (DC analysis).

Fig. 3 presents the results of modeling, which demonstrate visually the advantage in speed of the *Proposed high- speed CMOS voltage level converter* (PVLC) over the conventional high- speed CMOS voltage level converter (CVLC).

The table presents the numerical values of the time delays and their comparison in percent.

Measurements were done at VddL = 3 V, VddH = = 10 V, duration of the positive and negative fronts of the input signal  $t_{R,F(input)} = 6$  ns, capacity of load  $C_L = 20$  pF, and the measurements of a delay of transformation from 0.5 of the value of the amplitude of the voltage of the input signal up to 0.5 of the value of the amplitude of the voltage of the output signal and duration of the positive and negative fronts of the output signal  $t_{R,F(output)}$  from 0.1 up to 0.9 of the value of the level of the amplitude of the output signal, as is shown in fig. 4.

#### Conclusion

The work presents a high-speed CMOS voltage level converter and its basic electric circuit. Besides, it describes an original method for formation of a circuit of low conductivity, used in the proposed converter of the voltage level for minimization of the effect of counteraction of the transient process concerning a recharge of the output capacities of the trigger, for reduction of the delay of switching and the dynamic current of consumption. The proposed high-speed CMOS voltage level converter contains equivalent direct and inverse output inverters, which carry out not only the amplifying function, but also the function for organization of a preliminary installation in the network of tightening of high conductivity upwards. The results of the modeling of the proposed CMOS converter of level demonstrate that a switching delay was considerably reduced, approximately by 31 %. Besides, the proposed converter works in a wider range of the operating levels of voltage in comparison with the traditional versions.

#### References

1. Shibata N., Kiya H., Kurita S. et al. A 0.5-V 25-MHz 1-mW 256-Kb MTCMOS/SOI SRAM for solar-power-operated portable personal digital equipment — Sure write operation by using step-down negatively overdriven bitline scheme, *IEEE J. Solid-State Circuits.*, 2006, vol. 41, no. 3, pp. 728–742.

2. Ker M.-D., Hsu K.-C. Overview of on-chip electrostatic discharge protection design with SCR-based devices in CMOS intergrated circuit, *IEEE Trans. Device Mater. Reliabil.*, Jun. 2005, vol. 5, no. 2, pp. 235–249.

3. Adamov Ju. F., Balaka E. S., Isaeva T. Ju., Matveenko O. S. Raspredeljonnaja sistema zashhity KMOP-mikroshem ot jelektrostaticheskih razrjadov, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2017, vol. 19, no 1, pp. 60–64 (in Russian).

4. **Tilke A. T., Pescini L., Bauer M., Stiftinger M.** et al. Highly Scalable Embedded Flash Memory with Deep Trench Isolation and Novel Buried Bitline Integration for the 90-nm Node and Beyond, *IEEE trans. Electron Devices*, 2007, vol. 54, no. 7, pp. 1681–1688.

5. Otsuka N., Horowitz M. Circuit techniques for 1.5 V power supply flash memory, *IEEE J. Solid-State Circuits*, Aug. 1997, vol. 32, no. 8, pp. 1217–1230.

6. Kursun V., Friedman E. G. Multi-voltage CMOS Circuit Design, John Wiley & Sons, Ltd., August 2006, 242 p.

7. Gel'man M. V., Dudkin M. M., Preobrazhenskij K. A. *Preobrazovatel'naja tehnika*, Cheljabinsk: izd. c. JuUrGU, 2009, 464 p. (in Russian).

8. **Burkov A. T.** *Jelektronnaja tehnika i preobrazovateli*, Ucheb. dlja vuzov zh.-d. transp. Moscow: Transport, 1999, 425 p.

9. Tan S. C., Sun X. W. Low power CMOS level shifters by bootstrapping technique, *Electron. Letter*, 2002, vol. 38, no. 16, pp. 876–878.

10. Chavan A., MacDonald E. Ultra low voltage level shifters to interface sub and super threshold reconfigurable logic cells, *IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, Montana, 2008, pp. 1–6.

11. Koo K.-H., Seo J.-H., Ko M.-L. et al. A new level-up shifter for high speed and wide range interface in ultra deep submicron, *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 2005, vol. 2, pp. 1063–1065.

12. Kumar M., Arya S. K., Pandey S. Level Shifter Design for Low Power Applications, *International journal of computer science* & *information Technology*, Oct. 2010, vol. 2, no. 5, pp. 124–132.

13. Zhang Bo, Liang L., Wang X. A new level shifter with low power in multi-voltage system, *IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology*, Shanghai, 2006, pp. 1857–1859.

14. **Gupta Sh., Kumar M.** CMOS Voltage Level-Up Shifter — A Review, *International Journal of Advances in Engineering Sciences*, 2013, vol. 3, no. 3.

15. **Shubin V. V.** New CMOS Circuit Implementation of a One-Bit Full-Adder Cell, *Russian Microelectronics*, 2011, vol. 40, no. 2. pp. 119–127. 1139 p.

16. **Baker J. R.** *CMOS. Circuit Design, Layout, and Simultion*, Published by Wiley — IEEE Press, ISBN 9780470881323,  $2^{nd}$  ed., 2005, 1208 p.

17. Shubin V. V. Patent RF  $\mathbb{N}$  2604054. Preobrazovatel' urovnja naprjazhenija, *bjul.*  $\mathbb{N}$  34. 10.12.2016. 8 c.

18. **Rabaey J. M., Chandrakasan A., Nikolic B.** Digital Integrated Circuits: A Design Perspective, 2<sup>nd</sup> ed., Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 2002. 491 p.

19. **Wolf W.** Modern VLSI Design: System-on-Chip, Pearson Education, Inc., Prentice Hall, Third Edition, 2002. 618 p.

20. **Kaeslin Hubert.** *Digital Integrated Circuit Design. From VLSI Architectures to CMOS Fabrication*, Cambridge University Press, New York, 2008, 845 p.

### Рекомендации по оформлению материалов для публикации в журнале "НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА"

### МАТЕРИАЛЫ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫЕ В РЕДАКЦИЮ

- Статья, оформленная в соответствии с требованиями.
- Таблицы, иллюстрации и перечень подрисуночных подписей.
- Сведения об авторах (фамилия, имя, отчество, ученая степень, место работы, занимаемая должность, домашний и служебный адреса, телефоны, факс, e-mail).
- Статья на электронном носителе.
- Англоязычная информация.

### ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАЗМЕЩЕНИЯ МАТЕРИАЛА СТАТЬИ

- 1. Индекс УДК размещается в левом верхнем углу первой страницы.
- Сведения об авторах на русском языке размещаются перед названием статьи и включают инициалы и фамилию авторов с указанием их ученой степени, звания, должности и названия организации и места ее расположения (если это не следует из ее названия). Указывается также e-mail и/или почтовый адрес хотя бы одного автора или организации.
- 3. За сведениями об авторах следует название статьи.
- 4. После названия статьи отдельным абзацем дается **аннотация**, отражающая содержание статьи (что в ней рассмотрено, приведено, обосновано, предложено и т. д.).
- 5. Затем следуют ключевые слова.
- 6. Текст статьи.
- 7. Список литературы.
- 8. Англоязычная информация.

### АНГЛОЯЗЫЧНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

### (СОГЛАСНО ТРЕБОВАНИЯМ ЗАРУБЕЖНЫХ АНАЛИТИЧЕСКИХ БАЗ ДАННЫХ):

- инициалы и фамилии каждого автора, e-mail, полное название места работы и адрес (при совпадении места работы авторов нужно указывать его один раз для всей группы авторов);
- название статьи;
- аннотация статьи объемом не менее 200 слов, написанная качественным английским языком, отражающая основное содержание статьи с указанием цели, задачи, результатов исследования и кратких выводов;
- ключевые слова (10—12 слов);
- список литературы в романском алфавите (латинице), т. е. необходимо транслитерировать на латинский шрифт (см., например, http://translit.ru/) инициалы и фамилии авторов, название источника публикации и место издания, а технические сокращения (номер, том, страница и т. п.) должны быть переведены с использованием общепринятых обозначений (номер — N., том — Vol., страницы — Р. и т. п.).

Статья может быть отправлена по e-mail: nmst@novtex.ru с рисунками, вставленными в текстовый файл с расширением DOC.

Дополнительные пояснения авторы могут получить в редакции журнала лично, по телефонам: (499) 269-53-97, (499) 269-55-10 либо по e-mail.

#### АДРЕС РЕДАКЦИИ ЖУРНАЛА

107076, Г. МОСКВА, СТРОМЫНСКИЙ ПЕР., 4, ИЗДАТЕЛЬСТВО "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ" РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА "Нано- и микросистемная техника" Тел.: (499) 269-55-10; тел./факс: (499) 269-55-10 E-mail: nmst@novtex.ru http://microsystems.ru

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромынский пер., 4. Телефон редакции журнала (499) 269-5510. E-mail: nmst@novtex.ru Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Технический редактор *Т. А. Шацкая*. Корректор *Е. В. Комиссарова*.

Сдано в набор 21.09.2018. Подписано в печать 26.10.2018. Формат 60×88 1/8. Заказ MC1118. Цена договорная

Оригинал-макет ООО «Адвансед солюшнз». Отпечатано в ООО «Адвансед солюшнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

704 —

#### Рисунки к статье Я. Б. Эннса, Е. Н. Пятышева, Ю. Д. Акульшина, П. Б. Эннса «БИСТАБИЛЬНОЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОЕ РЕЛЕ НА ОСНОВЕ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ НЕЛИНЕЙНЫХ УПРУГИХ СТРУКТУР»

Ya. B. Enns, E. N. Pyatishev, Yu. D. Akulshin, P. B. Enns

«A BISTABLE MICROMECHANICAL RELAY BASED ON BUCKLING OF THE NONLINEAR ELASTIC STRUCTURES»



Рис. 3. Зависимость силы  $F_r$  от перемещения  $d_{1/2}$  и изменение сигнала S от времени t для аркообразной балки с однородной толщиной профиля (a) и переменной толщиной профиля (b):

I- результаты численного моделирования; 2- экспериментальные результаты; 3- аналитическая зависимость

Fig. 3. Dependence of force  $F_r$  on displacement of  $d_{1/2}$  and variation of signal S on time t for the archshaped beam with a homogeneous thickness of the profile (a) and variable thickness of the profile (b): 1 - results of numerical modeling; 2 - experimental results; 3 - analytical dependence



#### Рис. 4. Температурная зависимость привода:

*а* – зависимость смещения подвижного электрода привода от температуры; *b* – зависимость силы реакции упругого подвеса от перемещения привода при разных температурах *l* – результаты численного моделирования, *2* – результаты эксперимента

#### Fig. 4. Temperature dependence of the drive:

a - dependence of displacement of the mobile electrode of the drive on temperature; b - dependence of the force of reaction of the elastic suspension on the displacement of the drive at different temperatures 1 - results of numerical modeling, 2 - results of experiment

#### Рисунки к статье Я. Б. Эннса, Е. Н. Пятышева, Ю. Д. Акульшина, П. Б. Эннса «БИСТАБИЛЬНОЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОЕ РЕЛЕ НА ОСНОВЕ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ НЕЛИНЕЙНЫХ УПРУГИХ СТРУКТУР»

Ya. B. Enns, E. N. Pyatishev, Yu. D. Akulshin, P. B. Enns **«A BISTABLE MICROMECHANICAL RELAY BASED ON BUCKLING OF THE NONLINEAR ELASTIC STRUCTURES»** 



Рис. 7. Амплитудная A и фазовая ф характеристики привода бистабильного реле при разном давлении и напряжении U<sub>ce</sub> = 5 В; изменение частоты возбуждения в сторону низких частот

Fig. 7. Amplitude A and phase  $\varphi$  drive characteristics of the bistable relay at different pressures and voltage  $U_{ac} = 5$  V; change of the frequency of excitation towards low frequencies





Fig. 8. Amplitude characteristic of the drive of the bistable relay at voltage  $U_{ac} = 5$  V, quality factor Q = 4000 and different bias voltages  $U_{dc}$