

ISSN 1813-8586

НАНО-И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Том 21, № 5, 2019

- Нанотехнологии
- Зондовая микроскопия
- Микромашины и наносистемы
- Молекулярная электроника
- Биоактивные нанотехнологии
- Элементы датчиков и биочипы
- Микроэлектромеханические системы
- Микрооптоэлектромеханические системы
- Биомикроэлектромеханические системы

NANO- and MICROSYSTEMS TECHNOLOGY

Vol. 21, No. 5, 2019

The articles are published
in Russian and English



ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

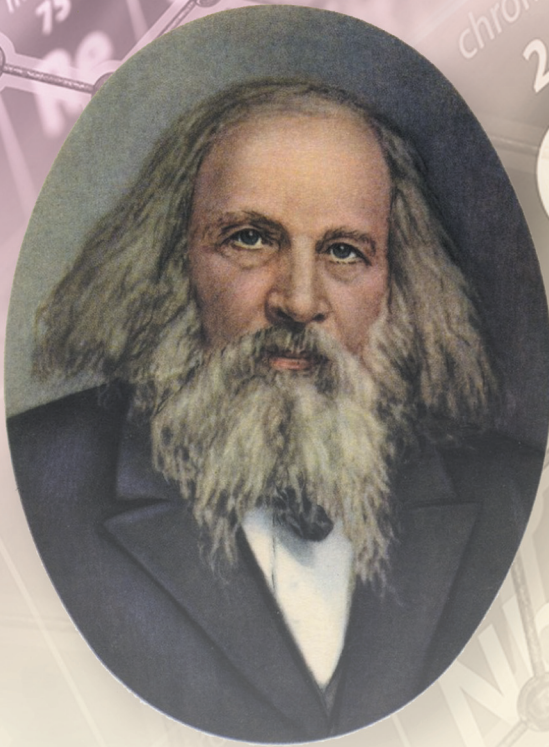
Периодический закон Д.И. Менделеева

Свойства атомов химических элементов, в т.ч. в лассе, зависят от их строения, которое находится в периодической зависимости от зарядов атомных ядер.

период	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
группы	IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VII B	VIII B	IB	IIB	IIIA	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA	VIIIA
1	1,00794 H																	4,002603 He
2	6,941 Li	9,012182 Be																20,1797 Ne
3	22,989769 Na	24,3040 Mg																39,948 Ar
4	39,0983 K	40,078 Ca	44,955910 Sc	47,867 Ti	50,9415 V	51,9961 Cr	54,938 Mn	58,933 Fe	58,933 Co	58,933 Ni	63,546 Cu	65,38 Zn	69,723 Ga	72,61 Ge	74,9216 As	78,96 Se	79,904 Br	83,80 Kr
5	85,4678 Rb	87,62 Sr	88,90589 Y	91,224 Zr	92,90638 Nb	95,94 Mo	101,07 Tc	101,07 Ru	102,9055 Rh	106,42 Pd	107,8682 Ag	112,411 Cd	114,916 In	118,710 Sn	121,760 Sb	127,60 Te	132,905 I	131,29 Xe
6	132,90545 Cs	137,327 Ba	138,9055 La	173,04 Hf	178,49 Ta	180,247 W	183,84 Re	186,207 Os	190,23 Ir	192,22 Pt	197,03 Au	200,59 Hg	204,387 Tl	208,9804 Pb	208,9804 Bi	208,9804 Po	208,9804 At	222 Rn
7	223 Fr	226 Ra	227 Ac	227 Th	232 Pa	232 U	238 Pu	244 Am	244 Cm	247 Bk	251 Cf	252 Es	257 Fm	261 Md	261 No	261 Lr	261 Lu	261 Uu

Лантаниды (4f-элементы): Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu.

Актиниды (5f-элементы): Th, Pa, U, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Md, No, Lr.



20 декабря 2017 года в ходе своей 72-й сессии Генеральная ассамблея ООН провозгласила 2019 год Международным годом Периодической таблицы химических элементов. Ранее эта инициатива была выдвинута Российской Федерацией в рамках ЮНЕСКО и была одобрена на 39-й сессии Генеральной конференции Организации.

Идею провозглашения Года поддержали более 150 ведущих мировых научных центров, включая Международный союз теоретической и прикладной химии, Международный союз теоретической и прикладной физики, Европейская ассоциация химических и молекулярных наук, Международный совет по науке, Международный астрономический союз, объединённый институт ядерных исследований (ОИЯИ), и Международный союз истории и философии науки. Проведение Международного года будет координироваться Международной программой ЮНЕСКО по фундаментальным наукам (МПФН) и Международным союзом теоретической и прикладной химии (МСТПХ) в сотрудничестве с национальными, региональными и международными химическими обществами и союзами.

В честь 150-летия Периодической таблицы в России и в мире пройдут масштабные мероприятия, посвящённые Дмитрию Ивановичу Менделееву и его научному наследию.

«Гениальный химик, первоклассный физик, плодотворный исследователь в области гидродинамики, метеорологии, геологии, в различных отделах химической технологии и других сопредельных с химией и физикой дисциплинах, глубокий знаток химической промышленности и промышленности вообще, особенно русской, оригинальный мыслитель в области учения о народном хозяйстве, государственный ум, которому, к сожалению, не суждено было стать государственным человеком, но который видел и понимал за-

дачи и будущее России лучше представителей нашей официальной власти». Такую оценку даёт Д.И. Менделееву известный русский химик и биохимик Л.А. Чугаев.

Д.И. Менделеев (1834–1907) оставил свыше 500 печатных трудов, является автором фундаментальных исследований по физике, метрологии, воздухоплаванию, метеорологии, сельскому хозяйству, экономике, народному просвещению, тесно связанных с потребностями экономического развития России. Организатор и первый директор Главной палаты мер и весов и один из организаторов Русского химического общества.

Открытие Менделеевым периодического закона химических элементов, одного из основных законов естествознания, датируется 1 марта 1869 г., когда он составил таблицу, озаглавленную «Опыт системы элементов, основанной на их атомном весе и химическом сходстве». Оно явилось результатом многолетних поисков. Он составил несколько вариантов периодической системы и на её основе исправил атомные веса некоторых известных элементов, предсказал существование и свойства ещё неизвестных элементов. На первых порах сама система, внесённые исправления и прогнозы Менделеева были встречены сдержанно. Но после открытия предсказанных им элементов (галлий, германий, скандий), периодический закон стал получать признание. Периодическая система явилась своего рода путеводной картой при изучении неорганической химии и в исследовательской работе в этой области.

Менделеев, являющийся автором более чем полутора тысяч трудов, имел огромный научный авторитет в мире. За свои заслуги учёный был удостоен многочисленных научных званий, российских и зарубежных наград, был почетным членом ряда научных обществ на родине и за границей.

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

Том 21. № 5 ♦ 2019

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 (РИНЦ) 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

Лабунюк 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.

Тимошенко 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. (науч. ред.)

Фокин В. А., к.х.н. (ред. перевода)

Щетинкин Д. А. (сайт)

СОДЕРЖАНИЕ

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Лысенко И. Е., Ткаченко А. В. Аналитический расчет напряжения притяжения интегрального электростатического МЭМС-переключателя с емкостным принципом коммутации в конфигурации с копланарной линией передачи 259

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Мирошникова В. Д., Рязанов А. А., Мирошникова Т. Д., Шугалов А. В. Развитие ионно-плазменных технологий на основе корончатых подложек 268

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Карушкин Н. Ф., Обухов И. А., Смирнова Е. А. Полупроводниковые компоненты и устройства электронной техники в коротковолновой части СВЧ диапазона. Часть III 288

Черепанов А. А., Новиков И. Л., Васильев В. Ю. Считывающая электроника для СКВИД-магнитометров постоянного тока. Часть 3. Полупроводниковая криогенная электроника 298

Берзин А. А., Морозов А. И., Сигов А. С. Чисто антиферромагнитная магнитоэлектрическая память на основе Cr_2O_3 310

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)

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

Адрес для переписки:

107076 Москва,

Стромынский пер., д. 4

e-mail: nmst@novtex.ru

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

NANO- and MICROSYSTEMS TECHNOLOGY

(Title "NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEKHNIKA")

ISSN 1813-8586 DOI: 10.17587/issn1813-8586

Vol. 21

No. 5

2019

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
Surov 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.)
Shehetinkin D. A. (site)

The Journal is included in the international databases 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.

CONTENTS

MODELLING AND DESIGNING OF MNST

Lysenko I. E., Tkachenko A. V. Analytical Calculation of the Offset Voltage of the Integrated Electrostatic MEMS Switch with the Capacitive Switching Principle in Configuration with a Coplanar Transmission Line 263

SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

Miroshnikova V. D., Ryazanov A. A., Miroshnikova T. D., Shukalov A. V. Development of the Ion-plasma Technologies on the Basis of the Castellate Substrate Holders 279

MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

Karushkin N. F., Obukhov I. A., Smirnova E. A. Semiconductor Components and Electronic Technology Devices in the Short Wave Section of the Microwave Radiation. Part III 293

Cherepanov A. A., Novikov I. L., Vasiliev V. Yu. Read-Out Electronics for dc-SQUID Magnetometers. Part 3. Semiconductor Cryogenic Electronics 305

Berzin A. A., Morosov A. I., Sigov A. S. Purely Antiferromagnetic Magnetoelectric Memory Based on Cr₂O₃ 316

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МЭМС MODELLING AND DESIGNING OF MNST

УДК 621.318.51, 621.3.049.7

DOI: 10.17587/nmst.21.259-267

И. Е. Лысенко, д-р техн. наук, доц., зав. каф., ielysenko@sfnu.ru, **А. В. Ткаченко**, аспирант, msqk@mail.ru,
Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения
ФГАОУ ВО "Южный Федеральный Университет", Таганрог, 347922, Российская Федерация

АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИТЯЖЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО МЭМС-ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ С ЕМКОСТНЫМ ПРИНЦИПОМ КОММУТАЦИИ В КОНФИГУРАЦИИ С КОПЛАНАРНОЙ ЛИНИЕЙ ПЕРЕДАЧИ

Поступила в редакцию 09.01.2019

На основе одномерной модели движения выполнен аналитический расчет управляющих напряжений разработанной конструкции интегрального электростатического микроэлектромеханического переключателя с емкостным принципом коммутации в конфигурации с копланарной линией передачи. Подвижным электродом переключателя является трехслойная металлическая мембрана с перфорацией, закрепленная на опорных элементах с помощью упругих элементов подвеса, выполненных в виде меандра, что позволяет достичь низких управляющих напряжений и высокой скорости переключения.

Ключевые слова: микроэлектромеханические системы, переключатель, электростатический механизм активации, емкостной принцип коммутации, одномерная модель движения, низкие управляющие напряжения

Введение

Механическое движение подвижных частей переключателей на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС) достигается путем электромагнитного [1], магнитостатического [2], электростатического [3], термоэлектрического [4], пьезоэлектрического [5] механизмов активации. Наибольшее распространение получили электростатические МЭМС-переключатели с емкостным принципом коммутации.

Основным недостатком такого типа МЭМС-переключателей является необходимость использования высоких управляющих напряжений (40...100 В для напряжения притяжения и 15...30 В для напряжения удержания соответственно), а также прилипание подвижных частей конструкции к неподвижным, вызванное электрическим зарядом диэлектрического слоя. Кроме того, возможны произвольные срабатывания переключателя в случае действия на его конструкцию внешних ускорений в положительном или отрицательном направлении осей X , Y , Z , вибрации или при коммутации сигналов высокой мощности.

Постановка задачи

Достижение высокой скорости переключения МЭМС-переключателей остается главной задачей. Малое количество научных работ посвящено рассмотрению данной проблемы, кроме решения, предложенного в работе [6], — это миниатюризация конструкции переключателя. В работе [7] продемонстрировано время переключения на уровне нескольких наносекунд, благодаря использованию диэлектрика в качестве материала подвижного электрода. В работе [8] продемонстрировано, что использование изогнутых (криволинейных) упругих элементов подвеса увеличивает коэффициент жесткости крепления подвижного электрода, а это влечет за собой рост резонансной частоты и, следовательно, снижение времени переключения. Однако увеличение жесткости упругих элементов подвеса неизбежно приводит к увеличению управляющих напряжений. Таким образом, снижение времени переключения отрицательно влияет на значение управляющих напряжений.

Данное исследование посвящено численному анализу управляющих напряжений на основе одномерной модели разработанной конструкции ин-

тегрального электростатического МЭМС-переключателя с емкостным принципом коммутации, в которой в качестве материала подвижного электрода используется трехслойная металлическая структура TiN/Al/TiN, позволяющая достичь низких значений управляющих напряжений, высокой скорости переключения без снижения надежности, что очень важно при проектировании такого типа переключателей.

Конструкция интегрального МЭМС-переключателя

Разработанная конструкция интегрального электростатического МЭМС-переключателя с емкостным принципом коммутации представлена на рис. 1 (см. третью сторону обложки).

Переключатель работает как переменный управляющий конденсатор с двумя составляющими емкости, зависящими от положения подвижного электрода. В нейтральном положении емкость между подвижным электродом и линией передачи невелика и сигнал беспрепятственно поступает на выход линии передачи. При подаче разности потенциалов между подвижным и неподвижным нижним электродами происходит перераспределение зарядов, что приводит к появлению между пластинами электростатических сил, не зависящих от полярности приложенного напряжения. Эти силы заставляют подвижный электрод опускаться на неподвижный нижний и, поскольку пластина изгибается, то в ней возникают силы упругости, стремящиеся вернуть ее в исходное состояние. Когда приложенная разность потенциалов достигает определенного порогового значения, силы упругости перестают уравновешивать электростатические силы, и подвижный электрод резко падает на неподвижный нижний. В нижнем положении подвижного электрода емкость между ним и линией передачи резко возрастает, и сигнал, поступающий на ее вход, шунтируется на заземляющие линии копланарного волновода.

Исследование электромеханических параметров переключателя

Движение подвижных частей конструкции переключателя может быть представлено с помощью одномерной модели конденсатора с двумя параллельными пластинами, как показано на рис. 2 (см. третью сторону обложки).

Уравнение (1) баланса сил, действующих на конструкцию переключателя, имеет следующий вид:

$$m \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = \sum F_n, \quad (1)$$

где z — перемещение подвижного электрода; $m = \rho A t$ — масса подвижного электрода, определяемая плотностью ρ , площадью A и толщиной пластины t ; F_n — силы.

Управляющее напряжение прикладывается между подвижным электродом переключателя, соединенным с линиями заземления копланарного волновода, и неподвижным нижним электродом. В этом случае на подвижный электрод переключателя действует сила электростатического взаимодействия F_e , которая уравновешивается силой упругости F_r , зависящей от коэффициента упругости k упругих элементов подвеса. Баланс сил существует до тех пор, пока сила упругости, являющаяся линейной функцией, может компенсировать рост силы электростатического взаимодействия, изменяющейся по квадратичному закону. В некоторый момент рост силы упругости не может компенсировать рост силы электростатического взаимодействия, и подвижный электрод падает на неподвижный нижний электрод.

На динамику работы переключателя также влияет наличие среды (как правило, воздуха или азота при герметизации), которая вводит собственное трение, вызывая демпфирование и изменение скорости переключения [9, 10]. Существуют несколько моделей, учитывающих подобный эффект демпфирования, в том числе при наличии отверстий в подвижном электроде [11, 12]. Кроме того, демпфирование влияет на изменение частоты собственных колебаний подвижного электрода.

Таким образом, уравнение (1) может быть преобразовано в уравнение следующего вида:

$$m \ddot{z} = F_e + F_r + F_s + F_d + F_c, \quad (2)$$

где \ddot{z} — ускорение; $F_e = \frac{1}{2} \frac{\partial C(z)}{\partial z} V^2$ — сила электростатического взаимодействия, как следствие приложенной разности потенциалов с изменением емкости между подвижным и неподвижным нижним электродами вдоль направления движения z ; V — управляющее напряжение; $F_r = k[d - z]$ — сила упругости, обусловленная жесткостью упругих элементов подвеса и противоположно направленная по отношению к силе электростатического взаимодействия F_e ; d — расстояние между электродами; $F_s = k_s[d - z]^3$ — сила нелинейного растяжения упругих элементов подвеса [13]; $F_d = -b\dot{z}$ — сила демпфирования, которая зависит от скорости движения подвижного электрода \dot{z} и параметра демпфирования b , что, в свою очередь, связано с геометрическими параметрами подвижного электрода и вязкостью среды; F_c — силы контактного взаимодействия, которые можно разделить на силы Ван-дер-Ваальса, действующие как силы притяжения, и поверхностные силы, выступающие в роли сил отталкивания, с возможным положением равновесия на заданном расстоянии относительно неподвижного нижнего электрода.

Емкость C переменного управляющего конденсатора в соответствии с рис. 2 определяется с помощью уравнения:

$$C(z) = \frac{\varepsilon_0 W w}{z}, \quad (3)$$

где ε_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума; w — ширина подвижного электрода; W — ширина неподвижного электрода.

Производная $C(z)$ используется для определения силы электростатического взаимодействия F_e и задается следующим уравнением:

$$\frac{\partial C(z)}{\partial z} = \frac{\varepsilon_0 W w}{z^2}. \quad (4)$$

Однако на практике применяется феноменологический подход, учитывающий влияние конкретных важнейших параметров, необходимых для описания динамических и электрических характеристик. Следовательно, уравнение (2) может быть преобразовано в уравнение следующего вида:

$$m \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + b \frac{\partial z}{\partial t} + kz = F_e, \quad (5)$$

где k — коэффициент жесткости упругих элементов подвеса.

При низких давлениях силой демпфирования F_d можно пренебречь, поскольку в системе преобладает инерция. Следовательно, уравнение (5) примет следующий вид:

$$m \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + kz = F_e. \quad (6)$$

Электростатическая сила F_e , действующая на подвижный электрод переключателя, определяется уравнением

$$F_e = \frac{1}{2} \varepsilon_0 A \frac{V^2}{z^2}. \quad (7)$$

Электростатическая сила F_e является нелинейной функцией, поскольку зависит от $1/z^2$, в то время как сила упругости F_r линейна относительно z . Расстояние z при различных значениях управляющего напряжения может быть вычислено из условия баланса сил $F_e = F_r$, действующих на подвижный электрод переключателя, с помощью уравнения

$$z^3 - dz^2 + \frac{\varepsilon_0 A V^2}{2k} = 0. \quad (8)$$

Решая это уравнение в инверсной форме, получим уравнение для определения значения порогового напряжения смещения подвижного электрода:

$$V(z) = \sqrt{\frac{2k}{\varepsilon_0 A} z^2 (d-z)}. \quad (9)$$

Анализируя уравнение (9), видим, что функция $V(z)$ достигает своего максимального значения при $z = 2d/3$, т. е. уравнение для определения напряжения притяжения подвижного электрода к неподвижному нижнему электроду будет иметь следующий вид:

$$V_{pull-down} = \sqrt{\frac{8k}{27\varepsilon_0 A}} d^3. \quad (10)$$

Напряжение удержания подвижного электрода в нижнем положении определяется уравнением

$$V_{hold-down} = \sqrt{\frac{2k}{\varepsilon_0 A}} (d-z) \left(z + \left(\frac{t_d}{\varepsilon_r} \right)^2 \right), \quad (11)$$

где t_d — толщина диэлектрического слоя; ε_r — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрического материала, нанесенного на поверхность нижнего электрода.

Напряжение, при котором подвижный электрод поднимется в исходное состояние, определяется уравнением

$$V_{return} = \sqrt{\frac{2t_d^2 k d}{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}}. \quad (12)$$

Коэффициент жесткости k упругих элементов подвеса определяется следующим уравнением:

$$k = k' + k'', \quad (13)$$

где k' — эффективный коэффициент жесткости упругого подвеса; k'' — коэффициент остаточных напряжений в упругом подвесе, определяемый уравнением следующего вида [13]:

$$k'' = 4 \left[8\sigma(1-\nu)w \left(\frac{l}{l} \right) \right], \quad (14)$$

где σ — предел прочности на растяжение; ν — коэффициент Пуассона; w, l, t — геометрические параметры упругого подвеса.

Для расчета эффективного коэффициента жесткости k' упругого подвеса, имеющего форму меандра, примененного в конструкции переключателя, используется уравнение следующего вида [14]:

$$k' = \left[\left(\frac{8N^3 a^3 + 2Nb^3}{3EI_x} \right) + \left(\frac{abN(3b + (2N+1)(4N+1))a}{3GJ} \right) - \left(\frac{Na^2 \left[\frac{2Na}{EI_x} + \frac{(2N+1)b^2}{GJ} \right]^2}{2 \left(\frac{a}{EI_x} + \frac{b}{GJ} \right)} \right) - \left(\frac{Nb^2 \left(\frac{a}{GJ} + \frac{b}{EI_x} \right)}{2} \right) \right]^{-1}, \quad (15)$$

где a, b, t — геометрические параметры меандра; E — модуль Юнга; G — модуль сдвига; I_x — момент инерции относительно оси x , определяемый выражением $I_x = \frac{wt^3}{12}$;

J — постоянная кручения, определяемая выражением $J = 0,413I_p$; I_p — полярный момент инерции, определяемый выражением $I_p = I_x + I_z$; N — число меандров в упругом подвесе.

Полная емкость переменного управляющего конденсатора в нейтральном положении подвижного электрода с учетом перфорации отверстиями определяется с помощью следующего уравнения [15]:

$$C_{total} = (a) + (b) + (c),$$

$$(a) = \frac{\varepsilon_0 w W}{\left(d + \frac{t_d}{\varepsilon_r}\right)} +$$

$$+ \frac{2\varepsilon_0 W}{\pi} \left[\ln \left[1 + \frac{2t}{d + \frac{t_d}{\varepsilon_r}} + 2 \sqrt{\frac{t}{\left(d + \frac{t_d}{\varepsilon_r}\right)} + \frac{t^2}{\left(d + \frac{t_d}{\varepsilon_r}\right)^2}} \right] \right],$$

$$(b) = n_l n_w \frac{\varepsilon_0 w h^2}{\left(d + \frac{t_d}{\varepsilon_r}\right)}, \quad (16)$$

$$(c) = \frac{2n_l n_w \varepsilon_0 w h}{\pi} \left[\ln \left[\frac{\pi w}{\left(d + \frac{t_d}{\varepsilon_r}\right)} \right] + \right.$$

$$\left. + \ln \left[1 + \frac{2t}{\left(d + \frac{t_d}{\varepsilon_r}\right)} + 2 \sqrt{\frac{t}{\left(d + \frac{t_d}{\varepsilon_r}\right)} + \frac{t^2}{\left(d + \frac{t_d}{\varepsilon_r}\right)^2}} \right] \right],$$

где w — ширина линии передачи; W — ширина пластины; t — толщина пластины; n_l — число отверстий по длине; n_w — число отверстий по ширине.

Для определения емкости в нижнем положении подвижного электрода необходимо в уравнении (16) принять $d = 0$.

На рис. 3 представлена рассчитанная зависимость перемещения подвижного электрода переключателя от приложенного напряжения смещения.

При значении приложенного напряжения смещения $V(z) < V_{pull-down}$ подвижный электрод переключателя находится в стабильной области пере-

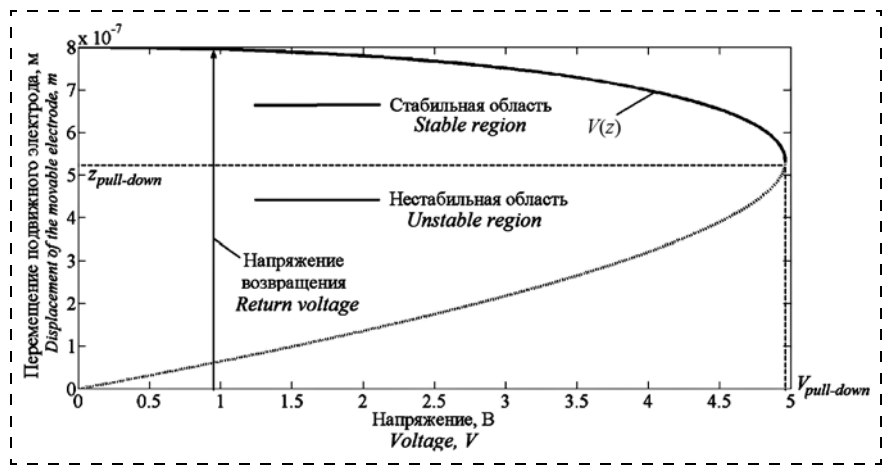


Рис. 3. Перемещение подвижного электрода под действием напряжения смещения
Fig. 3. Displacement of the movable electrode under the offset voltage

мещения. Однако при достижении приложенного напряжения смещения $V(z) \geq V_{pull-down}$ подвижный электрод резко падает вниз, переводя переключатель в выключенное состояние, что соответствует нестабильной области перемещения, изображенной на рис. 3. При уменьшении приложенного напряжения смещения подвижный электрод возвращается в исходное состояние, что соответствует размыканию переключателя и переводу его во включенное состояние, но это происходит при меньшем напряжении, чем напряжение притяжения $V_{pull-down}$, т. е. в системе появляется гистерезис.

Как можно заметить из уравнения (10), значение напряжения притяжения $V_{pull-down}$ может быть уменьшено несколькими способами. Во-первых, за счет уменьшения расстояния между подвижным и неподвижным электродами переключателя. Однако это негативно сказывается на значении отношения емкостей управляющего конденсатора, что, в свою очередь, влияет на значения вносимых потерь и изоляцию сигнала переключателя. Во-вторых, за счет увеличения площади подвижного электрода переключателя, что влечет за собой увеличение собственных потерь, а также увеличение остаточных напряжений, после удаления жертвенного слоя в технологическом процессе изготовления.

Таким образом, остается третий вариант, который предполагает снижение коэффициента жесткости крепления подвижного электрода. Крепление с помощью упругих элементов подвеса, выполненных в виде меандра, позволяет гибко решать задачу снижения управляющих напряжений в различных диапазонах частот.

По результатам аналитического расчета основные электромеханические параметры переключателя имеют следующие значения:

- коэффициент жесткости упругих элементов подвеса $k = 65,65$ Н/м;
- напряжение притяжения подвижного электрода в нижнее положение $V_{pull-down} = 5$ В;

- напряжение удержания подвижного электрода в нижнем положении $V_{hold-down} = 3,8$ В;
- напряжение возвращения подвижного электрода в исходное положение $V_{return} = 0,89$ В;
- емкость переменного управляющего конденсатора в исходном положении подвижного электрода $C_{up} = 4,145 \cdot 10^{-13}$ Ф;
- емкость переменного управляющего конденсатора в нижнем положении подвижного электрода $C_{down} = 1,1 \cdot 10^{-11}$ Ф.

Заключение

Проведен аналитический расчет основных электромеханических параметров разработанной конструкции интегрального электростатического МЭМС-переключателя с емкостным принципом коммутации в конфигурации с копланарной линией передачи. Низкие значения управляющих напряжений достигаются за счет малого коэффициента жесткости упругих элементов крепления подвижного электрода. Слои TiN обеспечивают высокую жесткость и твердость конструкции подвижного электрода для того чтобы преодолеть силу адгезии после снятия управляющего напряжения.

Результаты исследования получены с использованием оборудования Студенческого конструкторского бюро "Элементы и приборы инерциальных навигационных систем робототехники" Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного Федерального Университета (г. Таганрог) при финансовой поддержке "Программы развития Южного Федерального Университета до 2021 года", проект ВнГр-07/2017-10.

Список литературы

1. **Hosaka H., Kuwano H., Yanagisawa K.** Electromagnetic microrelays: Concepts and fundamental characteristic // Sens. Actuators A Physical. January 1994. Vol. 40, N. 1. P. 41–47.
2. **Wright J. A., Tai Y. C.** Magnetostatic MEMS relays for the miniaturization of brushless DC motor controllers // In Proceeding of the Technical Digest, 12th IEEE International Con-

ference on Micro Electro Mechanical Systems, 21 January 1999, Orlando, FL, USA. P. 594–599.

3. **Уваров И. В., Наумов В. В., Ваганова Е. И., Королева О. М., Амиров И. И.** Бистабильный МЭМС-переключатель с механизмом активного размыкания электродов // Нано- и микросистемная техника, 2016. Т. 18, № 9. С. 582–588.
4. **Daneshmand M., Fouladi S., Mansour R. R., Lisi M., Stajcer T.** Thermally Actuated Latching RF MEMS Switch and Its Characteristics // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, January 2010. Vol. 57, N. 12. P. 3229–3238.
5. **Kousuke M., Moriyama M., Esashi M., Tanaka S.** Low-voltage PZT-actuated MEMS switch monolithically integrated with CMOS circuit Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) // IEEE 25th International Conference, 29 Jan. 2012. C. 1153–1156.
6. **Mercier D., Caekenbergh K., Rebeiz G. M.** Miniature RF MEMS Switched Capacitors // In Proceeding of the IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 17 June 2005, Long Beach, CA, USA. P. 745–748.
7. **Mercier D., Charvet P. L., Berruyer P., Zanchi C. L., Lapierre L. O., Vendier O., Cazaux J. L., Blondy P.** A DC to 100 GHz high performance shunt switch // In Proceedings of the 2004 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 6–11 June 2004, Fort Worth, TX, USA. P. 1931–1934.
8. **Lacroix B., Pothier A., Crunteanu A., Cibert C., Dumas-Bouchiat F., Champeaux C., Catherinot A., Blondy P.** Sub-microsecond RF MEMS switched capacitors // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 2007. Vol. 55. P. 1314–1321.
9. **Chan E. K., Kan E. C., Dutton R. W.** Nonlinear Dynamic Modeling of Micromachined Switches // Proceeding of the IEEE MTT-Symposium. 1997. P. 1511–1514.
10. **Chan E. K., Dutton R. W.** Effect of Capacitors, Resistors and Residual Charge on the static and dynamic Performance of Electrostatically Actuated Devices // SPIE Symposium on Design and Test of MEMS/MOEMS, March 1999.
11. **Pasquale G., Veijola T., Soma A.** Gas Damping Effect on Thin Vibrating Gold Plates: Experiment and Modeling // Proceeding of DTIP Conference, 1–3 April 2009, Roma. P. 23–28.
12. **Veijola T.** Compressible Squeeze-Films in Vibrating MEMS Structures at High Frequencies // Proceeding of DTIP Conference, 1–3 April 2009, Roma. P. 235–238.
13. **Rebeiz G. M.** RF MEMS, Theory, Design and Technology. New York: John Wiley and Sons, NY, USA, 2004.
14. **Peroulis D., Pacheco S. P., Sarabandi K., Katehi L. P. B.** Electromechanical considerations in developing low-voltage RF MEMS switches // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 2003. Vol. 51. P. 259–270.
15. **Koushik G., Mithlesh K., Saurabh A., Srimanta B.** A modified capacitance model of RF MEMS shunt switch incorporating fringing field effects of perforated beam // Solid-State Electron. 2015. Vol. 114. P. 35–42.

I. E. Lysenko, D. Sc., Head of Department of Electronic Apparatuses Design, e-mail: ielysenko@sfedu.ru,
A. V. Tkachenko, Postgraduate Student, e-mail: msqk@mail.ru,
 Southern Federal University, Institute of Nanotechnology, Electronics and Electronic Equipment Engineering,
 Taganrog, 347922, Russian Federation

Corresponding author:

Lysenko Igor E., D. Sc., Head of Department of Electronic Apparatuses Design, Southern Federal University,
 Institute of Nanotechnology, Electronics and Electronic Equipment Engineering, Taganrog, 347922, Russian Federation,
 e-mail: ielysenko@sfedu.ru,

Analytical Calculation of the Offset Voltage of the Integrated Electrostatic MEMS Switch with the Capacitive Switching Principle in Configuration with a Coplanar Transmission Line

The authors present an analytical calculation of the control voltages of the developed design of the integrated electrostatic microelectromechanical switch with the capacitive switching principle in configuration with a coplanar transmission line. The calculation was done on the basis of the one-dimensional model of motion. The movable electrode of the switch is a three-layer metal membrane with the perforation fixed on the support elements by means of the elastic suspension elements, and made in the form of a meander, which allows to achieve low control voltages and high switching speed.

Keywords: microelectromechanical systems, switch, electrostatic activation mechanism, capacitive switching principle, one-dimensional motion model, low control voltages

For citation:

Lysenko I. E., Tkachenko A. V. Analytical Calculation of the Offset Voltage of the Integrated Electrostatic MEMS Switch with the Capacitive Switching Principle in Configuration with a Coplanar Transmission Line, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 5, pp. 259—267.

DOI: 10.17587/nmst.21.259-267

Introduction

Mechanical motion of the movable parts of the switches based on microelectromechanical systems (MEMS) is reached due to electromagnetic [1], magnetostatic [2], electrostatic [3], thermoelectric [4] and piezoelectric [5] mechanisms of activation. The most wide-spread are the electrostatic MEMS switches with the capacitive principle of switching.

The main drawback of this kind of MEMS switches is necessity for high control voltages (40—100 V for the pull-down voltage and 15—30 V for the hold-down voltage accordingly), and also sticking of the movable parts of the design to the fixed ones, caused by the electric charge of the dielectric layer. Besides, random switching is possible in case of action on its design of the external accelerations in the positive or negative direction of X , Y , Z axes, vibrations, or during switching of signals of high power.

Problem statement

The main task is still achievement of a high speed of switching for the MEMS switches. Few scientific works are devoted to consideration of this problem, besides the solution proposed in the work [6] — a miniaturization of the switch design. The work [7] demonstrates switching time at the level of several nanoseconds, thanks to the use of a dielectric as the material for the movable electrode. The work [8] demonstrates that the use of the curved (curvilinear) elastic elements of the suspension increases the coefficient of stiffness of fastening of the movable electrode, and this involves growth of the resonant frequency and, therefore, a decrease of the time of switching. However, increase of the stiffness of the elastic elements of the suspension leads inevitably to an increase of the control voltages. Thus, a decrease of the switching time has a negative effect on the value of the control voltages.

This research is devoted to a numerical analysis of the control voltages on the basis of a one-dimensional

model of the developed design of an integrated electrostatic MEMS switch with the capacitive principle of switching, in which the material of the movable electrode is a three-layer metal TiN/Al/TiN structure, allowing to reach low values of the control voltages and high switching speed without a detriment to its reliability, which is important in designing of this kind of switches.

Design of the integrated MEMS switch

The developed design of the integrated electrostatic MEMS switch with the capacitive principle of switching is presented in fig. 1 (see the 3-rd side of cover).

The switch works as a variable control condenser with two capacity components depending on the position of the movable electrode. In the neutral position the capacity between the movable electrode and the transmission line is small, and the signal freely arrives to the output of the transmission line. When the potential difference is supplied, a redistribution of the charges occurs between the movable electrode and the fixed lower electrode, which leads to emergence of the electrostatic forces between the plates, independent of the polarity of the applied voltage. These forces make the movable electrode go down to the fixed lower electrode, and since the plate bends, the elastic forces appear in it, seeking to return it to the initial state. When the applied potential difference reaches a certain threshold value, the elastic forces cease to counterbalance the electrostatic forces, and the movable electrode sharply falls on the fixed lower electrode. In the lower position of the movable electrode the capacity between it and the transmission line increases sharply, and the signal coming to its input is shunted to the grounding lines of the coplanar waveguide.

Research of the electromechanical parameters of the switch

The displacement of the movable parts of the design of the switch can be presented by means of a one-di-

mensional model of a condenser with two parallel plates, as shown in fig. 2 (see the 3-rd side of cover).

The equation (1) of the balance of forces operating on the design of the switch looks like the following:

$$m \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = \Sigma F_n, \quad (1)$$

where z — the displacement of the movable electrode; $m = \rho At$ — the mass of the movable electrode determined by density ρ , area A and thickness of the plate t ; F_n — the forces.

The control voltage is applied between the movable electrode of the switch connected to the lines of the grounding coplanar waveguide and the fixed lower electrode. In this case the movable electrode of the switch is affected by the force of the electrostatic interaction F_e , which is counterbalanced by the elastic force F_r , depending on coefficient of stiffness k of the elastic elements of the suspension. The balance of forces exists while the elastic force, which is a linear function, can compensate for the growth of the force of the electrostatic interaction varying in accordance with the square law. At a certain moment the growth of the elastic force cannot compensate for the growth of the force of the electrostatic interaction, and the movable electrode falls on the fixed lower electrode.

The dynamics of operation of the switch is also influenced by the existence of the environment (as a rule, air or nitrogen during sealing), which introduces its own friction, causing damping and variation of the speed of switching [9, 10]. There are several models, which take into account such a damping effect, including in the presence of openings in the movable electrode [11, 12]. Besides, damping influences variation of the frequency of the own fluctuations of the movable electrode.

Thus, the equation (1) can be transformed into the equation of the following kind:

$$m \ddot{z} = F_e + F_r + F_s + F_d + F_c, \quad (2)$$

where \ddot{z} — the acceleration; $F_e = \frac{1}{2} \frac{\partial C(z)}{\partial z} V^2$ — the force of the electrostatic interaction, as a result of the applied potential difference with a change of the capacity between the movable electrode and the fixed lower electrode along the direction of movement z ; V — the control voltage; $F_r = k[d - z]$ — the elastic force determined by the stiffness of the elastic elements of the suspension, and directed oppositely in relation to the force of electrostatic interaction F_e ; d — the distance between the electrodes; $F_s = k_s[d - z]^3$ — the force of the nonlinear stretching of the elastic elements of the suspension [13]; $F_d = -b\dot{z}$ — the damping force, which depends on the speed of the movement of the movable electrode \dot{z} and the parameter of damping b , which in

turn is connected with the geometrical parameters of the movable electrode and viscosity of the environment; F_c — the forces of contact interaction, which can be divided into Van der Waals forces operating as the attraction forces, and the surface forces acting as the pushing away forces with a possible position of balance at a set distance in relation to the fixed lower electrode.

According to fig. 2, capacity C of the variable control condenser is found by means of the following equation:

$$C(z) = \frac{\varepsilon_0 W w}{z}, \quad (3)$$

where ε_0 — the absolute dielectric permeability of vacuum; w — the width of the movable electrode; W — the width of the fixed electrode.

The derivative $C(z)$ is used for determination of the force of electrostatic interaction F_e and is set by the following equation:

$$\frac{\partial C(z)}{\partial z} = \frac{\varepsilon_0 W w}{z^2}. \quad (4)$$

However, in practice the phenomenological approach considering the influence of the concrete major parameters necessary for description of the dynamic and electric characteristics is applied. Therefore, the equation (2) can be transformed into the equation of the following kind:

$$m \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + b \frac{\partial z}{\partial t} + kz = F_e, \quad (5)$$

where k — the coefficient of stiffness of the elastic elements of the suspension.

At low pressures the force of damping can be neglected, because inertia prevails in the system. Therefore, the equation (5) will look the following:

$$m \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + kz = F_e. \quad (6)$$

The electrostatic force F_e , operating on the movable electrode of the switch is defined by the following equation:

$$F_e = \frac{1}{2} \varepsilon_0 A \frac{V^2}{z^2}. \quad (7)$$

Electrostatic force F_e is a nonlinear function, because it depends on $1/z^2$, while the elastic force F_r is linear in relation to z . At various values of the control voltage distance z can be calculated from the condition of the balance of forces $F_e = F_r$, operating on the movable electrode of the switch, by means of the following equation:

$$z^3 - dz^2 + \frac{\varepsilon_0 A V^2}{2k} = 0. \quad (8)$$

By solving this equation in an inverse form, will receive the equation for determination of the value of the threshold voltage of the movable electrode:

$$V(z) = \sqrt{\frac{2k}{\varepsilon_0 A} z^2 (d-z)}. \quad (9)$$

When analyzing the equation (9), we see that function $V(z)$ reaches its maximal value at $z = 2d/3$, i.e., the equation for determination of the pull-down voltage of the movable electrode to the fixed lower electrode will be following:

$$V_{pull-down} = \sqrt{\frac{8k}{27\varepsilon_0 A} d^3}. \quad (10)$$

Hold-down voltage of the movable electrode in the lower position is determined by the following equation:

$$V_{hold-down} = \sqrt{\frac{2k}{\varepsilon_0 A} (d-z) \left(z + \left(\frac{t_d}{\varepsilon_r} \right)^2 \right)}, \quad (11)$$

where t_d — the thickness of the dielectric layer; ε_r — the relative dielectric permeability of the dielectric material deposited on the surface of the lower electrode.

The voltage, at which the movable electrode rises to the initial state, is defined by the following equation:

$$V_{return} = \sqrt{\frac{2t_d^2 k d}{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}}. \quad (12)$$

The coefficient of stiffness k of the elastic elements of the suspension is defined by the following equation:

$$k = k' + k'', \quad (13)$$

where k' — the effective coefficient of stiffness the elastic suspension; k'' — the coefficient of the residual stresses in the elastic suspension determined by the equation of the following kind [13]:

$$k'' = 4 \left[8\sigma(1-\nu)w \left(\frac{t}{l} \right) \right], \quad (14)$$

where σ — the tensile strength; ν — the Poisson's coefficient; w , l , t — the geometrical parameters of the elastic suspension.

For calculation of an effective coefficient of stiffness k' of the elastic suspension with the form of a meander applied in the switch design, the equation of the following kind is used [14]:

$$k' = \left[\left(\frac{8N^3 a^3 + 2Nb^3}{3EI_x} \right) + \left(\frac{abN(3b + (2N+1)(4N+1))a}{3GJ} \right) - \right.$$

$$\left. - \left(\frac{Na^2 \left[\frac{2Na}{EI_x} + \frac{(2N+1)b}{GJ} \right]^2}{2 \left(\frac{a}{EI_x} + \frac{b}{GJ} \right)} \right) - \left(\frac{Nb^2 \left(\frac{a}{GJ} + \frac{b}{EI_x} \right)}{2} \right) \right]^{-1}, \quad (15)$$

where a , b , t — the geometrical parameters of the meander; E — the Young modulus; G — the shear modulus; I_x — the inertia moment in relation to axis x , de-

termined by expression $I_x = \frac{wt^3}{12}$; J — the torsion constant determined by expression $J = 0,413I_p$; I_p — the polar moment of inertia determined by expression $I_p = I_x + I_z$; N — the quantity of meanders in the elastic suspension.

The full capacity of the variable control condenser in the neutral position of the movable electrode taking into account perforation of holes is determined by means of the following equation [15]:

$$C_{total} = (a) + (b) + (c),$$

$$(a) = \frac{\varepsilon_0 w W}{\left(d + \frac{t_d}{\varepsilon_r} \right)} +$$

$$+ \frac{2\varepsilon_0 W}{\pi} \left[\ln \left(1 + \frac{2t}{d + \frac{t_d}{\varepsilon_r}} + 2 \sqrt{\frac{\frac{t}{d + \frac{t_d}{\varepsilon_r}} + \frac{t^2}{\left(d + \frac{t_d}{\varepsilon_r} \right)^2}}{\left(d + \frac{t_d}{\varepsilon_r} \right)^2}} \right) \right],$$

$$(b) = n_l n_w \frac{\varepsilon_0 w_h^2}{\left(d + \frac{t_d}{\varepsilon_r} \right)}, \quad (16)$$

$$(c) = \frac{2n_l n_w \varepsilon_0 w_h}{\pi} \left[\ln \left(\frac{\pi w}{\left(d + \frac{t_d}{\varepsilon_r} \right)} \right) + \right.$$

$$\left. + \ln \left(1 + \frac{2t}{\left(d + \frac{t_d}{\varepsilon_r} \right)} + 2 \sqrt{\frac{\frac{t}{\left(d + \frac{t_d}{\varepsilon_r} \right)} + \frac{t^2}{\left(d + \frac{t_d}{\varepsilon_r} \right)^2}}{\left(d + \frac{t_d}{\varepsilon_r} \right)^2}} \right) \right],$$

where w — the width of the transmission line; W — the plate width; t — the plate thickness; n_l — the quantity of holes along the length; n_w — the quantity of holes along the width.

In order to determine the capacity in the lower position of the movable electrode it is necessary to assume in the equation (16) that $d = 0$.

Fig. 3 presents the calculated dependence of displacement of the movable electrode of the switch on the applied voltage.

At the value of the applied voltage of $V(z) < V_{pull-down}$ the movable electrode of the switch is in the stable area of displacement. However, when the applied voltage $V(z) \geq V_{pull-down}$ is achieved, the movable electrode pull down sharply, transferring the switch to the switched-off position, which corresponds to the unstable area of the movement shown in fig. 3. In case of reduction of the applied voltage the movable electrode returns to the original position, which corresponds to the disconnection of the switch and its transfer to the turned-on state, but this occurs at a smaller voltage, than the pull-down voltage $V_{pull-down}$, i. e., hysteresis appears in the system.

As one can see from the equation (10), there are several ways to reduce the value of the pull-down voltage $V_{pull-down}$. The first one is to reduce the distance between the movable and fixed electrodes of the switch. However, this will have a negative effect on the value of the relation of the capacities of the control condenser, which, in turn, will influence the value of the brought losses and isolation of the switch signal.

The second one is to increase the area of the movable electrode of the switch, which involves an increase of its own losses and also increase of the locked-up stresses, after removal of the sacrificial layer in the technological production process.

Thus, there is the third option, which envisages a decrease of the coefficient of stiffness of fastening of the movable electrode. Fastening by means of the elastic elements of the suspension made in the form of a meander allows to solve flexibly the problem of the decrease of the control voltages in various ranges of frequencies.

Below presents the results of the analytical calculation of the key electromechanical parameters of the switch:

$$\begin{aligned} k &= 65.65 \text{ N/m}; & V_{pull-down} &= 5 \text{ V}; \\ V_{hold-down} &= 3.8 \text{ V}; & V_{return} &= 0.89 \text{ V}; \\ C_{up} &= 4.145 \cdot 10^{-13} \text{ F}; & C_{down} &= 1.1 \cdot 10^{-11} \text{ F}. \end{aligned}$$

Conclusion

An analytical calculation was done of the key electromechanical parameters of the developed design of the integrated electrostatic MEMS switch with the capacitive principle of switching in configuration with a coplanar transmission line. The low values of the control voltages are reached due to a small coefficient of stiffness of the elastic elements of fastening of the movable electrode. The TiN layers ensure high stiffness and hardness of the design of the movable electrode, necessary to overcome the adhesion force after removal of the control voltage.

The results were obtained using Equipment of the student design bureau "Elements and devices of inertial navigation systems of robotics" of the Institute of Nanotechnologies, Electronics and Electronic Equipment Engineering, Southern Federal University (Taganrog, Russia) with financial support of The Program for Development of the Southern Federal University up to 2021, project VnGr-07/2017-10.

References

1. Hosaka H., Kuwano H., Yanagisawa K. Electromagnetic microrelays: Concepts and fundamental characteristic, *Sens. Actuators A*, 1994, pp. 41–47.
2. Wright J. A., Tai Y. C. Magnetostatic MEMS relays for the miniaturization of brushless DC motor controllers, *In Proceeding of the Technical Digest, 12th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, 21 January 1999, Orlando, FL, USA, pp. 594–599.
3. Uvarov I. V., Naumov V. V., Koroleva O. M., Vaganova E. I., Amirov I. I., Bistabil'nyj MEMS-pereklyuchatel's mekhanizmom aktivnogo razmykaniya ehlektrodov, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2016, vol. 18, no. 9, pp. 582–588.
4. Daneshmand M., Fouladi S., Mansour R. R., Lisi M., Stajcer T. Thermally Actuated Latching RF MEMS Switch and Its Characteristics, *In IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, January 2010, vol. 57, no. 12, pp. 3229–3238.
5. Kousuke M., Moriyama M., Esashi M., Tanaka S. Low-voltage PZT-actuated MEMS switch monolithically integrated with CMOS circuit Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), *IEEE 25th International Conference*, 29 Jan. 2012, pp. 1153–1156.
6. Mercier D., Caekenberghe K., Rebeiz G. M. Miniature RF MEMS Switched Capacitors, *In Proceeding of the IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 17 June 2005, Long Beach, CA, USA, pp. 745–748.
7. Mercier D., Charvet P. L., Berruyer P., Zanchi C. L., Lapierre L. O., Vendier O., Cazaux J. L., Blondy P. A DC to 100 GHz high performance shunt switch, *In Proceedings of the 2004 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 6–11 June 2004, Fort Worth, TX, USA, pp. 1931–1934.
8. Lacroix B., Pothier A., Crunteanu A., Cibert C., Dumas-Bouchiat F., Champeaux C., Catherinot A., Blondy P. Sub-microsecond RF MEMS switched capacitors, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 2007, vol. 55, pp. 1314–1321.
9. Chan E. K., Kan E. C., Dutton R. W. Nonlinear Dynamic Modeling of Micromachined Switches, *Proceeding of the IEEE MTT-Symposium*, 1997, pp. 1511–1514.
10. Chan E. K., Dutton R. W. Effect of Capacitors, Resistors and Residual Charge on the static and dynamic Performance of Electrostatically Actuated Devices, *SPIE Symposium on Design and Test of MEMS/MOEMS*, March 1999.
11. Pasquale G., Veijola T., Soma A. Gas Damping Effect on Thin Vibrating Gold Plates: Experiment and Modeling, *Proceeding of DTIP Conference*, 1–3 April 2009, Roma, pp. 23–28.
12. Veijola T. Compressible Squeeze-Films in Vibrating MEMS Structures at High Frequencies, *Proceeding of DTIP Conference*, 1–3 April 2009, Roma, pp. 235–238.
13. Rebeiz G. M. *RF MEMS, Theory, Design and Technology*, New York, John Wiley and Sons, NY, USA, 2004.
14. Peroulis D., Pacheco S. P., Sarabandi K., Katehi L. P. B. Electromechanical considerations in developing low-voltage RF MEMS switches, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 2003, vol. 51, pp. 259–270.
15. Koushik G., Mithlesh K., Saurabh A., Srimanta B. A modified capacitance model of RF MEMS shunt switch incorporating fringing field effects of perforated beam, *Solid-State Electron.*, 2015, vol. 114, pp. 35–42.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

УДК 621.385.64

DOI: 10.17587/nmst.21.268-287

В. Д. Мирошникова¹, канд. техн. наук, **А. А. Рязанов**², канд. техн. наук, доц., инж.-конструктор,
Т. Д. Мирошникова³, канд. экон. наук, доц., **А. В. Шугалов**⁴, инж.-проектировщик,

¹ e-mail: vera.miroschnikowa@yandex.ru,

² Новые технологии лазерного термоупрочнения, г. Радужный Владимирской обл.,
e-mail: aaryazanov@rambler.ru,

³ Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых, Владимир, e-mail: tavem@ezhka.elcom.ru,

⁴ БКН-Проект, г. Санкт-Петербург, e-mail: djsan@bk.ru

РАЗВИТИЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ОСНОВЕ КОРОНЧАТЫХ ПОДЛОЖКОДЕРЖАТЕЛЕЙ

Поступила в редакцию 15.02.2019

Представлено перспективное направление развития ионно-плазменных технологий на основе новых видов модульных конструкций подложкодержателей, оснащенных подложконесущими поверхностями с динамичными свойствами. Раскрыт ряд теоретических положений, стадии и результаты разработки конструкций одно- и двухцикловых корончатых подложкодержателей с композиционными построениями подложконесущей поверхности внутри рабочего пространства работающей магнетронной установки. Раскрыта морфология и кинематика варьирующей по форме и размерам подложконесущей поверхности

Ключевые слова: магнетронная распылительная система, подложконесущая поверхность, структурно-кинематическая формула, комбинаторные построения подложконесущей поверхности

Производство нанопокровов с использованием газометаллической или газокерамической плазмы одна из наиболее перспективных и проблемных индустрий. Обе грани в своем пределе характеризуются тождественно: уникальные. Создание бушующей ионно-плазменной технологической среды с принципиально новыми свойствами генерирует множество сложных задач, в частности, связанных с организацией ее функционирования внутри закрытого пространства. В течение нескольких часов оно недоступно внешнему вмешательству. Речь идет о возможности выполнения совокупности приемов, связанных с манипуляциями подложками без отключения установки: филигранно выполнить все требования по позиционированию различных поверхностей подложки относительно потоков распыляемого материала; убрать готовые, установить следующие в те же — лучшие позиции, оптимальные для формирования качественного покрытия; переставить подложки от одной мишени к другой, минуя ненужные транзитом.

Внутренними операторами организационного развития ионно-плазменных технологий должны служить управляемые в автоматическом режиме подложкодержатели [1].

Цель работы: повышение эффективности технологической среды магнетронных установок на основе разработки конструкций подложкодержателей, оснащенных подложконесущими поверхностями (ПНП) с динамичными свойствами

Перечень задач

1. Раскрыть возможности современных конструкций подложкодержателей по операционализации подложками.
2. Представить стадийность развития конструкций подложкодержателей, оснащенных ПНП с динамичными свойствами.
3. Раскрыть особенности конструирования признаков подложкодержателя с комбинаторными построениями ПНП внутри рабочего пространства

работающей магнетронной установки (его морфологию и кинематику).

4. Разработать конструкции подложкодержателей с варьирующей по форме и размерам ПНП — корончатых подложкодержателей и показать их работу.

В решении поставленных задач использованы представления о кинематическом способе образования поверхностей, основные положения теории строения грузонесущих поверхностей [2].

Возможности современных конструкций подложкодержателей по операционализации подложками

Конструкция подложкодержателя в общем варианте исполнения включает державку, ПНП с элементами размещения и фиксации подложек, привод (приводы) перемещений. В состав перемещений, реализуемых подложкодержателем, могут входить:

— технологические перемещения подложек относительно атомных потоков, распыляемых с мишени магнетронной распылительной системы (МРС);

— перемещения по межмодульной передаче подложек;

— установочные перемещения, связанные с позиционированием той или иной поверхности подложки относительно потока осаждаемых атомов.

В довольно большом секторе установок для нанесения покрытий методом магнетронного распыления подложкодержатели реализуют только технологические перемещения подложек относительно МРС. Для нанесения покрытия требуется один установ (технологические базы подложки не меняются). Это во многом освоенная стадия развития с огромным числом вариантов для разных, в том числе крупногабаритных категорий изделий. Перемещения подложки, вращательные относительно своей оси и (или) оси поворотной платформы, с размещенными на ней другими подложками, и (или) круговые относительно МРС или оси подложкодержателя, либо поступательные между МРС или вдоль МРС по замкнутой траектории — это только часть уже реализованного множества вариантов перемещений подложек под воздействием распыляемых с мишеней атомных потоков. В качестве примеров приведем запатентованные карусельные и другие решения магнетронных установок Италии [3], России [4—6], Японии [7, 8].

Перемещения по межмодульной передаче подложек не всегда доступная для подложкодержателя функция. Множество решений по ее реализации зачастую пополняется устройствами, как правило, оригинальными, но не спутниками подложек — подложкодержателями. Американской компанией *Applied Science and Technology* для манипуляции

подложками запатентован двурукий многозвенный робот. Он компактно размещен в транспортном модуле с возможностью поворота и перемещения подложек между модулем загрузки и технологическим модулем [9]. Для передачи подложек в вакуумную камеру и выгрузки из нее компанией *Leybold AG* разработано устройство в виде поворотного стола с верхним и нижним дисковыми подложкодержателями [10]. Компанией *Leybold Systems GmbH* (Германия) получен патент на "Воздушный шлюз для введения подложек и/или их удаления из камеры обработки" — ступенчатая откачка совмещена с круговым размещением подложек в шлюзах по периферии установочного диска [11]. Примером подложкодержателя, реализующего межмодульную передачу, является решение японских изобретателей, заявитель — *Dainippon Printing Co., Ltd.* [8].

Среди актуальных функций развития подложкодержателей — выполнение установочных перемещений в целях размещения каждой из обрабатываемых поверхностей подложек в позицию, оптимальную для формирования качественного покрытия, а именно — по нормали к вектору потока распыляемого материала [12].

Востребованность функции велика. В доказательной части приведем примеры решений, имеющих мировую новизну.

1. Массовое поточное производство жидкокристаллических панелей поколения G6 (размером 1800 × 1500 мм) для дисплейных устройств. Плазменное покрытие самой простой по форме прямоугольной панели требует два установочных перемещения: размещение в вертикальном положении и размещение в горизонтальном положении (источник плазмы сбоку подложки). Узел подложкодержателя и магнетронная установка запатентованы [8].

2. Массовое поточное производство ходового товара — емкостей для напитков. Изделие несколько сложнее. Покрытие только для наружной поверхности емкости и горловины. Технологией изготовления покрытия предусмотрено три установочных перемещения (над источником плазмы): размещение в горизонтальном положении с возможностью вращения относительно собственной оси; размещение в вертикальном положении горловиной вниз (к источнику плазмы); и снова размещение в горизонтальном положении с возможностью вращения относительно собственной оси. Версия производства запатентована [11].

В обоих случаях для тысяч изделий разработан один жесткий алгоритм выполнения установочных перемещений подложкодержателя.

Но, массовое производство — это только 20 %. Остальное — это неодинаковые 50...90 тыс. изделий, различные по своим конструктивно-технологическим параметрам.

Стадийность развития конструкций подложкодержателей, оснащенных ПНП с динамичными свойствами

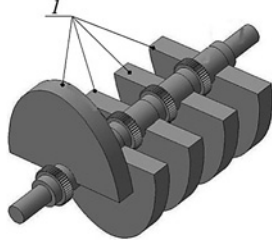
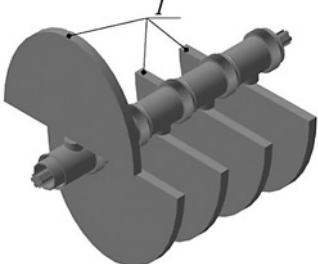
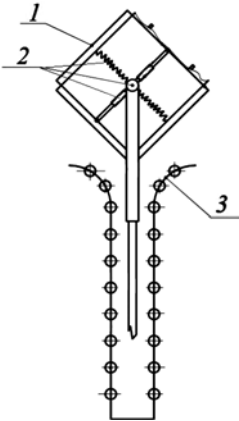
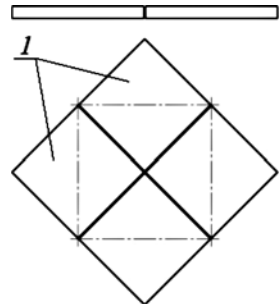
Каким должен быть подложкодержатель, чтобы иметь возможность гибко реагировать на условия среднесерийного, мелкосерийного типов производств, на потребности экспериментальных лабораторий?

Исследования в данном направлении ведутся систематически. *В качестве мощного резерва морфообразования и видообразования конструкций подложкодержателей следует рассматривать его базовый компонент — подложконесущую поверхность.* Пока он находится в "спящем" состоянии. В эксплуатируемых конструкциях подложкодержателей ПНП в вакуумной камере статична: не меняет формы, размеров. Направленность исследо-

ваний определил вектор разработки подложкодержателей, включающих ПНП с динамическими свойствами. В приведенной здесь таблице стадийность процесса раскрыта на взаимосвязанных примерах запатентованных конструкций подложкодержателей.

Стадия 1. ПНП расчленена на секции — насадки. Они размещены на одной оси, определяющей оптимальное расположение подложек относительно вектора потока осаждаемых атомов, при этом имеют возможность автономного перехода из позиции ожидания в рабочую позицию. На каждой насадке решается своя технологическая задача. В технологическую среду магнетронного распыления, разработанную на базе двух или четырех МРС [16], введен компонент групповой маршрутизации подложек с различными требованиями к нанопок-

Стадии развития конструкций подложкодержателей, оснащенных ПНП с динамичными свойствами

1	2
<p>Нужная подложка в заданный момент выходит в позицию распыления требуемого материала с установленным временем выстоя. На эскизе — подложкодержатель, выполненный модульным по количеству секций 1 ПНП. Секции смонтированы на поворотных державках, снабженных автономными приводами поворота [12].</p>  <p>Предназначен для получения нанопокровов на изделиях с односторонней рабочей поверхностью.</p>	<p>Принципы гибкой маршрутизации реализованы для подложек с различным количеством поверхностей покрытия. На эскизе — роторный подложкодержатель с секциями 1 ПНП, смонтированными на лопках поворотными относительно поворотных державок [13].</p>  <p>Значения размерных характеристик ПНП в позиции обработки и в позиции ожидания одинаковы.</p>
3	4
<p>Позиционно-трансформируемая ПНП при выходе в рабочую позицию раскрывается и совершает повороты, при возврате в позицию ожидания складывается, преобразуясь в плоскую конструкцию. Резко сокращается длина обоймы [14]. На эскизе — раскрытие ПНП 1, оснащенной механизмом раскрытия 2 в момент выхода из направляющих 3.</p>  <p>Свертка одной размерной характеристики позиции ожидания.</p>	<p>Задачи стадии: — разработка ПНП с варьирующей формой; — компактизация ПНП [15]. Предпосылки разработки: Решение автоматизированной системы инструментального обеспечения (АСИО), в котором геометрическое построение секционной грузонесущей поверхности (ГРП) удачно сочетается с эффективной схемой ее компактизации как по высоте, так и в горизонтальной плоскости. На эскизе — ГРП 1 АСИО, выполненная секционной [18].</p> 

рытиям в условиях одной загрузки камеры. В основе решения — модульная конструкция подложкодержателя и размещение позиции ожидания в непосредственной близости к рабочей позиции. Новая видовая конструкция подложкодержателя объединила подвиды, различающиеся конструктивным решением ПНП: подложкодержатель роторный и рамочный. Решение предназначено для получения покрытий на такие изделия, как штампы, литейные формы, чем определены границы его применения.

Стадия 2. Каждая насадка получила возможность совершать повороты относительно своей (вертикальной) оси. Объединены два неоспоримых качества — выход насадки из позиции ожидания в рабочую позицию и оптимальный доступ рабочей среды к большинству поверхностей подложки. Это ранее недоступное преимущество магнетронных систем. По отношению к прототипу вместимость насадки-ротора повышается до 2 раз. Область применения расширяется многократно.

Стадия 3. Поставлен вопрос о дифференциации размеров пространства, занимаемого ПНП в рабочей позиции и позиции ожидания. В рабочей позиции — максимальное рассредоточение ПНП во избежание перекрытия поверхностей подложек. В позиции ожидания ПНП должна быть максимально "сжата" — занимать минимальное пространство. Для решения задачи разработан новый вид модульных конструкций подложкодержателя с позиционно-трансформируемой ПНП. Раскрывающаяся ПНП занимает большой объем, формирует рыхлую, пригодную для свободного проникновения атомов среду. Каждая подложка в общем потоке двигается либо по своей, непересекающейся с другими подложками траектории, либо повторяя траекторию предыдущей подложки с определенным промежутком времени. Для рассредоточения мест размещения подложек разработаны точечная и линейная схемы [17]. В позиции ожидания — в державку обоймы насадка-рама опускается, плавно складываясь, по вертикальным направляющим. Предлагаемая в решении схема свертки "обнуляет" размер одной диагонали поперечного сечения четырехгранной призмы, преобразуя ее в плоскую конструкцию. Это позволяет резко сократить длину обоймы с подложкодержателями.

Складывание шарнирной конструкции в поперечнике связано с увеличением ее высоты на величину $b = 2c - d$, где c — высота грани ПНП, d — размер диагонали поперечного сечения призмы. Это несколько снижает эффективность свертки: в меньшей степени изменяется объем, занимаемый подложкодержателем в позиции ожидания.

Стадия 4. Решения двух задач (в границах возможного) надо объединить в одной конструкции. Сложить два максимума, чтобы увидеть ПНП, рас-

крывающуюся в различных композициях граней и вариантах их размещения, и ее свертку, "обнуляющую" высоту ПНП. Первая задача идет по линии индивидуализации требований и, следовательно, расширения возможностей подложкодержателя, вторая — по линии миниатюризации носителя функции.

Предпосылки к разработке решения имеются. Для гибких производственных систем машиностроительного производства авторами была разработана автоматизированная система инструментального обеспечения (АСИО) [18]. Магазин инструментов АСИО выполнен поворотным относительно вертикальной оси. ГРП магазина выполнена в виде квадрата и расположена в горизонтальной плоскости. При этом она расчленена по осям симметрии на секции, установленные на опорах с возможностью поворота на прямой угол относительно горизонтальных осей качания. Секции в исходном положении образуют одну ровную горизонтальную поверхность, а в рабочем положении — корончатую ГРП. При свертке по высоте другие размерные характеристики ГРП сохраняют свое значение. Привод поворота секций общий, перемещение секций синхронное.

Конструирование признаков подложкодержателя с комбинаторным построением ПНП внутри рабочего пространства

Состав и перемещения исполнительных механизмов корончатого подложкодержателя должны позволять создавать пространство с плотной сеткой возможных координат расположения подложек в позициях, оптимальных для формирования качественного покрытия, — по нормали к вектору потока распыляемого материала, без перекрытия другими подложками.

Выбор признаков для разработки ПНП с требуемым составом свойств, как это следует из таблицы, предопределило запатентованное ранее авторами решение ГРП АСИО [18]. Решение отвечает требованиям качества нанесения покрытия на поверхности довольно большого перечня деталей с различной геометрией.

Морфология ПНП представлена с позиций структурно-кинематического способа образования поверхностей [3]. Поверхность рассматривается как геометрический образ (след), полученный интегрирующими перемещениями образующей в пространстве. Корень *integer* (лат. — целый) в определении перемещений указывает на процесс, ведущий к состоянию связанности позиций образующей ПНП в целое.

По типу образующей определяется базовый признак "Уровень интеграции ПНП". Образующая первого уровня интеграции — место размещения и

фиксации одной подложки или объемно-планировочный элемент (ОПЭ). В целях упрощения описания ПНП ОПЭ представлен в виде материальной точки. В этом случае образующая второго уровня интеграции — линия; третьего уровня интеграции — плоскость; четвертого уровня — объем; пятого уровня — совокупность объемов и т. д. Альтернативные проявления признака "Уровень интеграции ПНП" — это качественно отличающиеся друг от друга типы систем структурообразования, в рамках которых формируются свойства, функциональные возможности ПНП.

В прототипе ГРП третьего уровня интеграции.

В зависимости от выбора конструкции секции ПНП модульного подложкодержателя может представлять собой различное по составу компонентов структурно-кинематическое образование, например:

— первого уровня интеграции (на каждом модуле размещено место для одной подложки)

$$(O_{YRI=I})[EX_A];$$

— второго уровня интеграции

$$(O_{YRI=I})[RW_y(\varphi)] \rightarrow (O_{YRI=II})[EX_A];$$

— третьего уровня интеграции

$$(O_{YRI=I})[FY] \rightarrow (O_{YRI=II})[RW_y(\varphi)] \rightarrow (O_{YRI=III})[EX_A].$$

В круглых скобках указана геометрическая часть определителя поверхности — образующая. В квадратных скобках указана алгоритмическая часть. Она включает перемещения образующей на уровне интеграции.

При представлении компонентов, образующих ПНП, введены следующие обозначения:

$YRI = j$ — j -й уровень интеграции;

$O_{YRI=j}$ — образующая j -го уровня интеграции;

Y , W_y — векторы перемещения образующей на уровне интеграции: поступательного в направлении оси OY и поворотного относительно оси OY ;

F , R , E — число дискретных перемещений образующей в выбранном направлении;

X_A — автономное размещение образующих на векторе перемещения X .

В ПНП второго уровня интеграции секция представляет собой ОПЭ (место размещения и фиксации одной подложки). Как показано в структурно-кинематической формуле, ОПЭ совершает R шагов — дискретных перемещений — поворотов на угол, равный 90° , вокруг оси OY . ПНП — это след образующей. При $R = 4$ получаем четырехсекционную ПНП.

При выборе формы и числа секций следует учитывать, что в свернутом состоянии ПНП, при размещении секций в одной горизонтальной плоскос-

ти при смыкании их вершин и прилегающих к ним боковых граней должна получаться плотная укладка. Секция может быть квадратной, ромбической, треугольной или представлять собой сектор диска.

В ПНП третьего уровня интеграции секция представляет собой формозадающую компоненту с простой структурой — упорядоченную интегрирующим перемещением ОПЭ совокупность нескольких мест размещения и фиксации подложек. В представленном варианте указано линейное размещение подложек в направлении оси OY . В обоих вариантах размер кругового (поворотного) перемещения W_y образующей относительно оси OY фиксирован заданным числом секций.

Множитель R задает число операторов (секций) комбинаторного построения ПНП, образуя множество C , при этом поворотное перемещение относительно оси подложкодержателя $W_y(\varphi)$ задает их расстановку в вакуумной камере.

Каждая секция оснащена автономным приводом перемещения и переключателем перемещений (моторизованная часть подложкодержателя).

Мультипликатор E на интегрирующем перемещении $X_{(A)}$ в обеих структурно-кинематических формулах указывает на кратное размещение образующей второго и, соответственно, третьего уровня интеграции вдоль оси OX . Автономное размещение образующих $X_{(A)}$ указывает на модульное построение ПНП и, соответственно, на модульное построение конструкции подложкодержателя. Его возможности увеличиваются кратно.

Раскроем кинематику представленных вариантов ПНП — основу разработки конструкций подложкодержателей, самых различных вариантов приводов исполнительных механизмов. Раскрытие секций ПНП начинается с ее центра поднятием вершин и поворотом секций в направлении от центра к периферии — из горизонтального положения в вертикальное — в позицию обработки, с возможным продолжением выдвижения секций в позиции обработки.

Для возможности позиционирования подложек относительно вектора потока распыляемого материала ПНП может быть установлена в подложкодержателе с возможностью совершения дискретных поворотов относительно вертикальной оси подложкодержателя и выстоя по времени распыления мишени в заданных позициях (первый вариант исполнения) или с возможностью подъема из позиции ожидания в позицию обработки, совершения дискретных поворотов относительно вертикальной оси подложкодержателя в раскрытом или свернутом состоянии, выстоя в заданных позициях и возврата в позицию ожидания (второй вариант исполнения).

ПНП может работать как в указанном режиме совершения установочных перемещений секций,

так и в режиме непрерывных круговых технологических перемещений относительно МРС.

Таким образом, каждая секция в подложкодержателе в зависимости от варианта его исполнения выполняет определенную последовательность установочных и технологических перемещений:

1) первый вариант исполнения (одноцикловая технология):

⇒ автономные, дискретные — раскрытие ПНП:

— поворотные относительно горизонтальной оси в пределах от горизонтального положения до вертикального;

— поступательные — выдвигание секций;

⇒ общие, ПНП в раскрытом состоянии:

— поворотные непрерывные относительно вертикальной оси;

— поворотные дискретные относительно вертикальной оси;

⇒ автономные, дискретные — свертка ПНП:

— поворотные относительно горизонтальной оси в пределах от вертикального положения до горизонтального;

— поступательные (возврат секции в исходное положение);

2) второй вариант исполнения (двухцикловая технология):

⇒ общие (ПНП с размещенными на ней подложками в свернутом состоянии):

— поступательные из позиции ожидания в позицию обработки;

— поворотные непрерывные относительно вертикальной оси;

— поворотные дискретные относительно вертикальной оси;

⇒ автономные, дискретные — раскрытие ПНП:

— поворотные относительно горизонтальной оси в пределах от горизонтального положения до вертикального;

— поступательные (дискретные) — выдвигание секций;

⇒ общие, ПНП в раскрытом состоянии:

— поворотные непрерывные относительно вертикальной оси;

— поворотные дискретные относительно вертикальной оси;

⇒ автономные, дискретные (свертка ПНП):

— поворотные относительно горизонтальной оси в пределах от вертикального положения до горизонтального;

— поступательные (возврат секции в исходное положение);

⇒ общие, ПНП в свернутом состоянии:

— поступательные из позиции обработки в позицию ожидания.

Указанные признаки создают требуемые свойства ПНП, на их основе она варьирует, изменяя свои

размеры и форму. Выдержки из формулы изобретения "Корончатый подложкодержатель" [15]:

— "ПНП выполнена с возможностью раскрытия, складывания и фиксации в любом промежуточном положении";

— "каждая секция ПНП установлена с возможностью... перемещения... в заданную позицию обработки с образованием корончатой ПНП в заданном варианте сочетания используемых секций и заданном варианте размеров их фиксированных перемещений, включая ее вертикальное положение".

Техническое решение ПНП, каждый из признаков которой принимает различные значения из определенной области, представлено в формуле предельно сжатой вербальной формы модели комбинаторного анализа — "с образованием корончатой ПНП в заданном варианте сочетания используемых секций и заданном варианте размеров их фиксированных перемещений". Это модель строения ПНП и получения требуемого варианта ПНП.

В целом, вариативность конструктивных построений ПНП, проводимых внутри рабочего пространства работающей магнетронной установки, обеспечивает совокупное действие девяти признаков:

— число секций ПНП (множество $C = \{c_1, c_2, c_3, c_4\}$),

— варианты сочетаний используемых секций ПНП. Альтернативный ряд возможных состояний признака "Варианты сочетаний секций, используемых в технологической наладке" ниже задан булеаном:

$$P(C) = \{\{c_1\}, \{c_2\}, \{c_3\}, \{c_4\}, \{c_1, c_2\}, \{c_1, c_3\}, \{c_1, c_4\}, \{c_2, c_3\}, \{c_2, c_4\}, \{c_3, c_4\}, \{c_1, c_2, c_3\}, \{c_1, c_2, c_4\}, \{c_1, c_3, c_4\}, \{c_2, c_3, c_4\}, \{c_1, c_2, c_3, c_4\}\};$$

— виды установочных перемещений секций ПНП;

— виды установочных перемещений ПНП;

— число размеров фиксированных поворотных перемещений секций относительно горизонтальной оси в пределах от горизонтального положения до вертикального — $W_X(\varphi)$ при ее раскрытии;

— число размеров фиксированных поступательных перемещений секций (выдвижения и возврата) относительно вертикальной оси — Y ;

— число размеров фиксированных поворотных перемещений ПНП относительно вертикальной оси при позиционировании секций (подложек) относительно мишени — $W_y(\varphi)$;

— возможность совершения возвратно-поступательных перемещений ПНП из позиции ожидания в позицию обработки в свернутом состоянии. Это не только дополнительная возможность позиционирования подложек в горизонтальном положении, но и дополнительный размер перемещения ПНП в рабочую позицию;

— число модулей подложкодержателя.

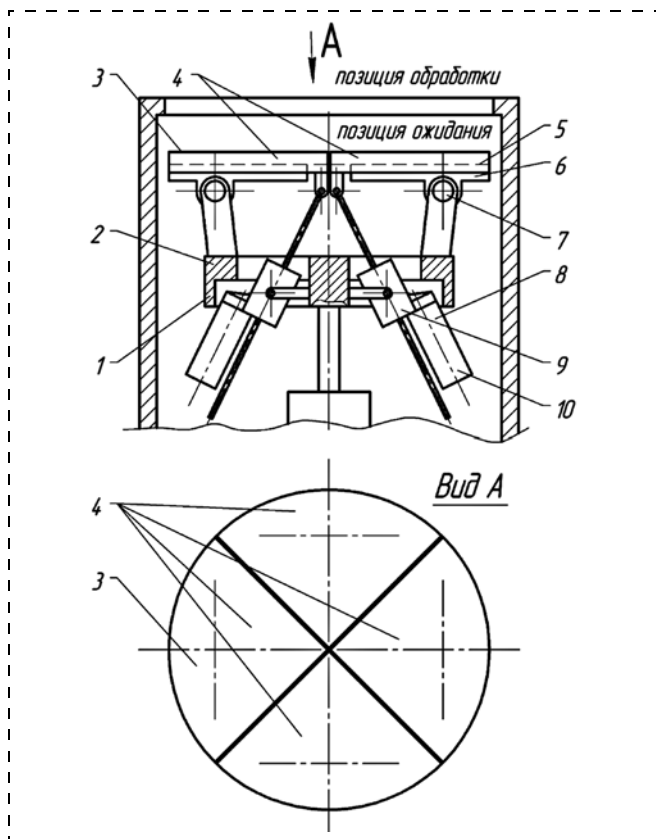


Рис. 1. Общий вид корончатого одноциклового подложкодержателя: 1 — подложкодержатель; 2 — поворотная рама; 3 — секционная ПНП; 4 — секции; 5 — направляющие; 6 — кулиса; 7 — горизонтальные оси; 8 — автономный привод перемещений секции; 9 — корпус автономного привода секции; 10 — электродвигатель

Fig. 1. General view of a castellate one-cyclic substrate holder: 1 — substrate holder; 2 — rotary frame; 3 — section SHS; 4 — sections; 5 — guides; 6 — coullise; 7 — horizontal axes; 8 — autonomous drive for movement of the sections; 9 — case of the autonomous section drive; 10 — electric motor

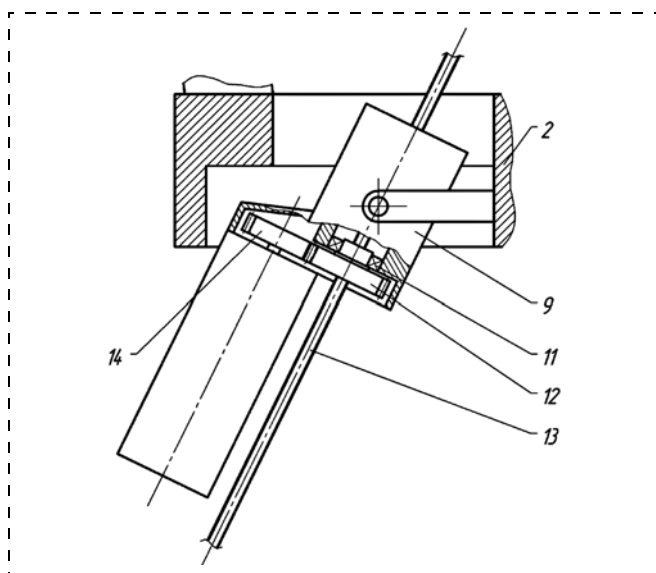


Рис. 2. Привод автономного перемещения секции ПНП: 11 — подшипник; 12 — зубчатое колесо; 13 — ходовой винт; 14 — шестерня

Fig. 2. Drive for autonomous displacement of SNS section: 11 — bearing; 12 — cogwheel; 13 — running screw; 14 — gear wheel

Конструкции и работа корончатых подложкодержателей

Корончатый подложкодержатель продолжает серию модульных подложкодержателей, оснащенных ПНП с динамичными свойствами [12—14].

Здесь представлены два варианта конструкций корончатого подложкодержателя: одноцикловый и двухцикловый, включающих по одному модулю.

В корончатом одноцикловом подложкодержателе несущая ПНП рама установлена с возможностью совершения цикла поворотных перемещений относительно вертикальной оси в позиции обработки и снабжена управляемым приводом поворотных перемещений.

В корончатом двухцикловом подложкодержателе несущая ПНП рама установлена с возможностью совершения цикла поворотных перемещений в позиции обработки и цикла поступательных перемещений относительно вертикальной оси — подъема из позиции ожидания в позицию обработки и возврата в позицию ожидания, и снабжена, соответственно, двумя управляемыми приводами — поворотных перемещений и поступательных перемещений.

В качестве примера в подложкодержателях использованы разные варианты ПНП:

- в одноцикловом подложкодержателе показаны варианты использования дисковой и квадратной ПНП;

- в двухцикловом подложкодержателе ПНП выполнена в виде квадрата.

Конструкция корончатого одноциклового подложкодержателя показана на рис. 1—3.

Подложкодержатель 1 включает поворотную вокруг вертикальной оси раму 2, на которой смонтирована секционная ПНП 3 с управляемыми автономными приводами перемещений 8 и автономными переключателями перемещений секций 4, а также привод поворота рамы.

ПНП в свернутом состоянии представляет собой диск с четырьмя секциями, она установлена на раме с возможностью раскрытия и складывания в позиции обработки, а также нахождения в свернутом состоянии в позиции ожидания.

Каждая секция установлена на направляющих 5 кулисы 6 с возможностью совершения поступательного перемещения вдоль направляющих кулисы и с этой целью снабжена управляемым автономным приводом перемещений и автономным переключателем перемещений. Для ограничения размера поступательного перемещения секции предусмотрены упоры.

Кулисы секций размещены в раме с возможностью совершения автономного поворота вокруг горизонтальных неподвижных осей 7 в пределах от горизонтального положения кулисы до вертикаль-

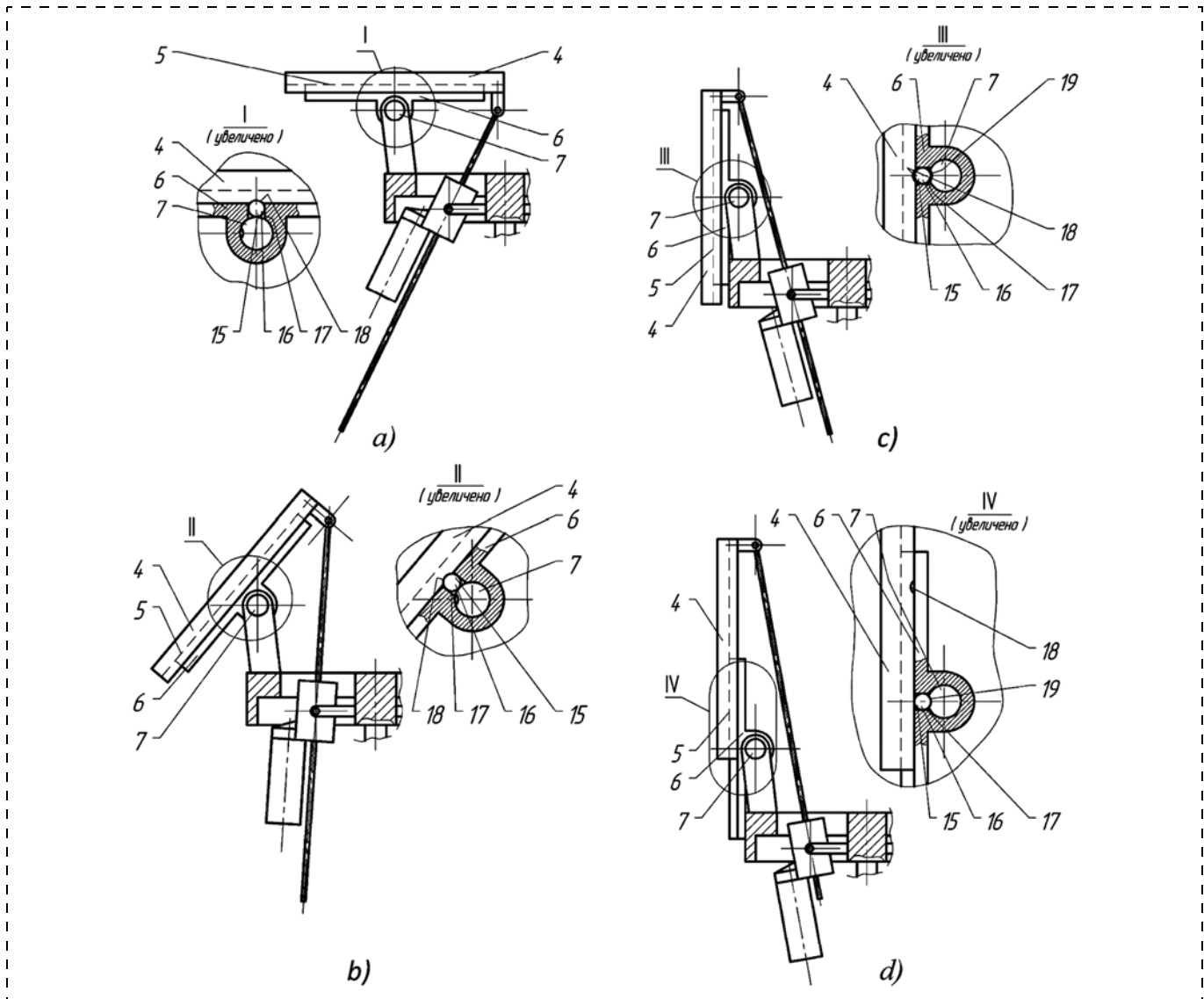


Рис. 3. Позиции переключателя в различных фазах перемещения секции: *a* — секция в позиции ожидания; *b* — промежуточное положение секции в процессе ее поворота относительно горизонтальной оси; *c* — завершение поворота секции в вертикальное положение; *d* — выдвижение секции в позицию обработки; 15 — автономный переключатель; 16 — ролик; 17 — паз; 18 — лунка в секции; 19 — лунка в оси кулисы

Fig. 3. Switch positions in various phases of the section displacement: *a* — section in the position of expectation; *b* — intermediate section position in the course of its turn in relation to the horizontal axis; *c* — completion of the turn of the section into the vertical position; *d* — advancement of the section into the processing position; 15 — autonomous switch; 16 — roller; 17 — groove; 18 — a hole in the section; 19 — a hole in the coulisse axis

ного. Поворот каждой кулисы с размещенной на ней секцией также ограничен упорами.

Корпус 9 автономного привода перемещения каждой секции ПНП (см. рис. 1 и 2) шарнирно закреплен в раме. На корпусе размещен электродвигатель 10. В корпусе с возможностью вращения в подшипнике 11 установлено зубчатое колесо 12, имеющее резьбовое отверстие с пропущенным через него ходовым винтом 13. На валу электродвигателя установлена шестерня 14, входящая в зацепление с зубчатым колесом. Конец ходового винта шарнирно связан с секцией.

Для возможности позиционирования секций относительно вектора потока распыляемого материала в конструкции корончатого подложкодержателя

предусмотрен привод поворота рамы, оснащенный датчиком углового поворота и датчиком выстоя по времени. Привод поворота может работать как в указанном режиме совершения установочных перемещений секций, так и в режиме непрерывного вращения рамы относительно вертикальной оси подложкодержателя.

Автономный переключатель 15 перемещений секции ПНП подложкодержателей показан на рис. 3 на примере квадратной ПНП.

Переключатель выполнен в виде ролика 16, установленного с гарантированным зазором в пазу 17 кулисы с возможностью захода в лунки 18 и 19 в крайних (граничных по диапазону поворота) положениях секции: в вертикальном положении — в

лунку 19, выполненную в оси кулисы; в горизонтальном или промежуточном положении — в лунку 18, выполненную в секции.

Управление работой корончатого подложкодержателя осуществляется системой управления магнетронной установкой. В позиции ожидания секции подложкодержателя с размещенными и зафиксированными на них подложками находятся в горизонтальном положении (см. рис. 3, а).

Для раскрытия секции ПНП по сигналу системы управления включается электродвигатель автономного привода перемещения секции, при этом вращение вала посредством установленной на нем шестерни передается на зубчатое колесо. В результате ходовой винт выдвигается вверх из корпуса привода раскрытия ПНП. В данном положении секции ролик переключателя находится в лунке секции, блокирует ее поступательное перемещение относительно кулисы, поэтому при выдвигании ходового винта кулиса только поворачивается вокруг оси (см. рис. 3, б).

Когда кулиса достигнет вертикального положения (см. рис. 3, с) — до контакта с упором, ее дальнейший поворот становится невозможным. При этом паз с находящимся в нем роликом переключателя оказывается напротив лунки, выполненной в оси. В результате дальнейшее выдвигание вверх ходового винта приводит к перемещению секции вдоль направляющих кулисы вверх. Место лунки занимает плоская поверхность секции, выталкивающая ролик. В результате ролик переключателя перемещается в пазу кулисы из лунки секции в лунку оси (см. рис. 3, д). Таким образом происходит автоматическое переключение перемещения секции. Поворот кулисы относительно оси блокируется, но становится возможным поступательное перемещение секции в направляющих кулисы. При дальнейшем выдвигании вверх ходового винта секция продолжает перемещение в направляющих кулисы вверх до упора в верхнем положении и занимает вертикальное положение в позиции обработки. На этом раскрытие секции ПНП подложкодержателя завершается.

Относительно мишени секция позиционируется за счет поворота рамы вокруг вертикальной оси на любое заданное угловое перемещение. Наиболее востребованные позиции: поз. I — угловое перемещение секции относительно мишени, равное 0° ; поз. II — 90° ; поз. III — 180° ; поз. IV — 270° . Время выстоя секции в каждой позиции определяется технологическими показаниями и контролируется датчиком.

Для складывания секции ПНП по сигналу системы управления включается электродвигатель автономного привода перемещения секции. При этом вращение вала электродвигателя через шестерню передается на зубчатое колесо. За счет реверса

электродвигателя зубчатое колесо вращается в противоположную сторону и ходовой винт перемещается вниз в корпусе привода перемещения секции ПНП. Поворот кулисы относительно оси в данном положении заблокирован роликом переключателя, находящимся в лунке оси (см. рис. 3, д), вследствие чего перемещение вниз ходового винта приводит к перемещению вниз секции в направляющих кулисы. При перемещении секции в нижнее положение до упора ее дальнейшее перемещение в направляющих кулисы становится невозможным (см. рис. 3, с). При этом паз с находящимся в нем роликом переключателя оказываются напротив лунки, выполненной в секции. В результате дальнейшее перемещение вниз ходового винта приводит к совершению кулисой поворота вокруг оси. При этом ролик переключателя переместится в пазу кулисы из лунки оси в лунку секции, т. е. происходит обратное автоматическое переключение перемещения, в результате чего поступательное перемещение секции в направляющих кулисы блокируется, но становится возможным поворот кулисы относительно оси. При дальнейшем перемещении вниз ходового винта кулиса продолжит поворот вокруг оси в горизонтальное положение до упора (см. рис. 3, а), внутрь рамы — в одну горизонтальную плоскость с другими секциями, до смыкания их вершин и прилегающих к ним боковых граней. При складывании всех секций образуется плотная укладка ПНП.

Управление раскрытием и сверткой ПНП основано на общем принципе, который заключается в том, что одновременное перемещение секции вдоль направляющих кулисы и поворот кулисы вокруг оси невозможны. Либо кулиса может поворачиваться вокруг оси, но при этом блокируется секция в крайнем — горизонтальном положении от совершения поступательного перемещения в направляющих кулисы. Либо секция может перемещаться поступательно вдоль направляющих кулисы, но при этом блокируется кулиса в вертикальном положении от совершения поворота вокруг оси.

Роторная составляющая перемещений секции полностью обеспечивает размещение различных вертикальных поверхностей подложек по нормали к вектору потока распыляемого материала.

Изменение вектора наклона секции обеспечивает размещение по нормали к вектору потока распыляемого материала различных, близких к горизонтальному расположению поверхностей подложек.

Корончатый двухциклового подложкодержатель 1 представлен на рис. 4.

ПНП подложкодержателя выполнена в виде квадрата, расчлененного на секции по осям симметрии, и смонтирована на раме с возможностью раскрытия, складывания и нахождения в свернутом состоянии в позиции обработки, а также нахождения в свернутом состоянии в позиции ожидания.

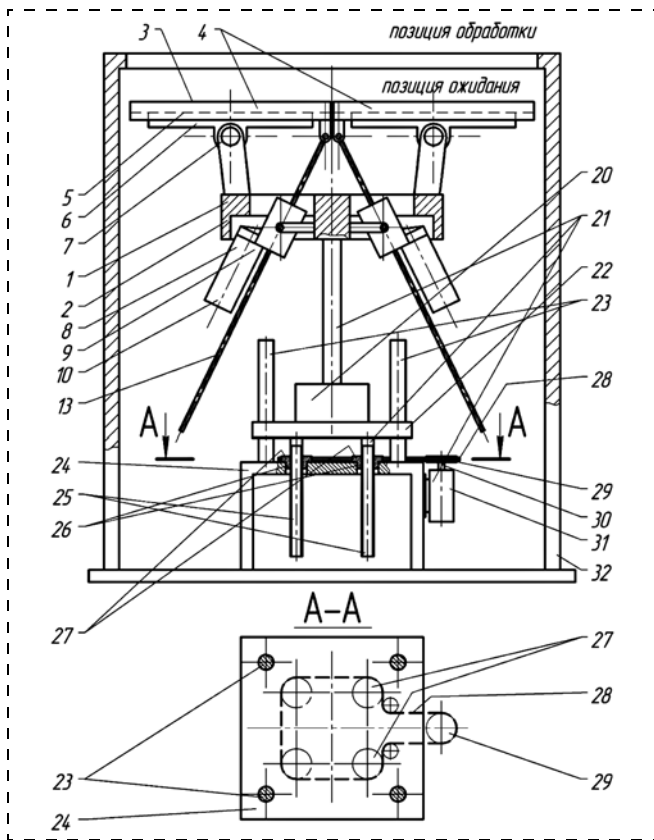


Рис. 4. Общий вид двухциклового корончатого подложкодержателя: 21 — привод поступательных перемещений рамы; 22 — подъемная плита; 23 — вертикальная направляющая; 24 — основание; 25 — ходовые винты; 26 — гайки; 27 — звездочки, выполненные на наружных поверхностях гаек; 28 — приводные цепи; 29 — звездочка на валу электродвигателя; 30 — вал электродвигателя; 31 — электродвигатель; 32 — корпус подложкодержателя

Fig. 4. General view of a two-cyclic castellate substrate holder: 21 — drive for the forward displacements of the frame; 22 — lifting plate; 23 — vertical guide; 24 — basis; 25 — running screws; 26 — nuts; 27 — the asterisks made on the external surfaces of the nuts; 28 — driving chains; 29 — an asterisk on the electric motor shaft; 30 — electric motor shaft; 31 — electric motor; 32 — case of the substrate holder

С этой целью приводная поворотная рама выполнена с возможностью поступательного перемещения относительно вертикальной оси: подъема ПНП в позицию обработки из позиции ожидания и ее возврата в позицию ожидания.

Для выполнения поступательных перемещений рамы корончатого подложкодержателя относительно вертикальной оси в его конструкции предусмотрен привод 21.

Привод включает несущую подложкодержатель подъемную плиту 22, установленную с возможностью подъема и опускания на вертикальных направляющих 23. Направляющие смонтированы на основании 24. На подъемной плите жестко закреплены ходовые винты 25. В основании установлены с возможностью вращения относительно вертикальных осей гайки 26, образующие с винтами винтовые передачи. На наружной поверхности гаек выполнены звездочки 27. Посредством цепи 28 они соединены со звездочкой 29, установленной на

валу 30 электродвигателя 31, в цепную передачу. Электродвигатель жестко закреплен на основании, смонтированном в корпусе 32 подложкодержателя.

В остальном конструкция двухциклового корончатого подложкодержателя аналогична конструкции одноциклового корончатого подложкодержателя.

Для работы корончатого двухциклового подложкодержателя задается последовательность использования раскрытой и свернутой ПНП. Если технологией нанесения покрытий первым предусмотрен выход в позицию обработки свернутой ПНП, то по команде системы управления сначала выполняется цикл подъема рамы. При включении электродвигателя движение посредством установленной на валу звездочки и цепи передается на звездочки, выполненные на наружных поверхностях гаек винтовых передач. При этом гайки получают однонаправленное вращение, и ходовые винты перемещаются вверх, выдвигая плиту вдоль направляющих. В результате ПНП в свернутом состоянии поднимается из позиции ожидания в позицию обработки. После чего выполняется цикл поворота рамы: включается привод поворота для позиционирования секций относительно МРС. Цикл полностью обеспечивает размещение горизонтальных поверхностей подложек, например их нижних, верхних и боковых сторон по нормали к вектору потока распыляемого материала, что создает определенные преимущества перед одноцикловым подложкодержателем. После завершения нанесения покрытия на свернутой ПНП дается команда по ее раскрытию (подробное описание работы исполнительных механизмов дано выше, см. одноцикловой подложкодержатель). Реверс двигателя приводит к обратному движению ПНП из позиции обработки в позицию ожидания.

Заключение

Совокупность отличительных признаков корончатого подложкодержателя обеспечивает в целом повышение эффективности технологической среды магнетронных установок. Это перспективная разновидность модульных конструкций подложкодержателя, обладающих комплексом свойств: существенным расширением вариантов размещения поверхностей подложек в позициях, оптимальных для формирования качественного покрытия; маршрутной гибкостью; эксплуатационной гибкостью; возможностью эффективной свертки ПНП.

Наиболее эффективно использование одноциклового и двухциклового корончатых подложкодержателей в технологической среде магнетронного распыления, разработанной на базе двух или четырех МРС для получения различных вариантов покрытий на подложках в условиях одной загрузки вакуумной камеры. Сочетание новых и базовых при-

знаков, свойственных конструкциям модульных подложкодержателей, обеспечивает более высокую функциональность корончатых подложкодержателей по сравнению с ранее запатентованными конструкциями подложкодержателей.

По эффективности схемы компактизации ПНП корончатые подложкодержатели существенно превосходят ранее запатентованные конструкции модульных подложкодержателей. Результативность предлагаемой в решении схемы свертки ПНП определяется в первом приближении отношением высоты корончатой ПНП в позиции обработки (размер диагонали секции) к высоте свернутой ПНП в позиции ожидания (толщина опорной поверхности ПНП). Возможности эффективной компактизации ПНП используются многогранно. В двухцикловом подложкодержателе свернутая ПНП используется в качестве наиболее эффективного средства оптимального размещения подложек в позиции обработки для нанесения покрытия на их нижние и верхние грани.

Список литературы

1. **Мирошникова В. Д., Шугалов А. В., Мирошникова Т. Д.** Основы гибкой маршрутизации подложек в ионно-плазменных технологиях // Электромагнитное поле и материалы: Материалы XX Междунар. конф. Национально-исследовательский университет МЭИ. — М.: АльянсИнвест, 2012. С. 623—629.
2. **Мирошникова В. Д., Мирошникова Т. Д.** Концепция элементарных признаков как основа теории строения складских и накопительных систем с ячеистой структурой // Вестник машиностроения. 2012. № 10. С. 76—81.
3. **Pat. WO 03/076684, (IT)**, Int. Cl.⁷ C23C14/56. SYSTEM FOR VACUUM METALLIZATION OF OBJECTS TREATED IN BATCHES / CENI, Mario; FANFANI, Stefano (IT); Applicant GALILEO VACUUM SYSTEM S R L (IT); CENI, Mario; FANFANI, Stefano (IT); — Appl. No. PGT/IT03/00131; Filed 08.03.2002; Date of Patent 18.09.2003. — 32 p.
4. **Pat. RU 2280097, МПК C23C 14/35** (2006.01). Магнетронное распылительное устройство / Кузьмин О. С., Косякин Л. Г., Лихачев В. Н. (RU); заявитель Институт физики прочности и материаловедения Сибирское отделение Российской Академии Наук (ИФПМ СО РАН) (RU), Общество с ограниченной ответственностью "Научно-производственное предприятие "Вакуумные ионно-плазменные технологии" (НПП "ВИП-Технологии") (RU). — № 2004106036/02; заявл. 01.03.2004; опубл. 20.07.2006, Бюл. 20. 6 с.
5. **Pat. RU 1 644 553, МПК C23C 14/50** (1990). Вакуумная установка для нанесения покрытий / Коровкин А. В., Усачев Г. А., Полунина О. В. (RU); заявитель Волжское объединение по производству автомобилей (RU). — № 4764153/21; заявл. 02.08.1989; опубл. 15.10.1994, Бюл. 27. — 2 с.
6. **Pat. RU 2058427, МПК C23C 14/34** (1995.01). Вакуумная установка для нанесения покрытий / Дерюгин А. И., Жалилов Р. Х., Рогов А. В. (RU); заявители Дерюгин А. И., Жалилов Р. Х., Рогов А. В. (RU). — № 93031133/02; заявл. 01.06. 1993; опубл. 20.04.1996, Бюл. 11. 9 с.
7. **Pat. US 2008178796**, Int. Cl. C23C14/50 (2006.01). FILM FORMING APPARATUS / Shinji Furukawa; Masahiro Shibamoto (JP); Applicant ANELVA Corporation (JP). — Appl. No. 12/031,474; Filed 14.02.2008; Pub. Date 31.06.2008. 30 p.
8. **Pat. JP 2009161817**, Int. Cl. C23C14/34; C23C14/50. SUBSTRATE HOLDER PART AND SPUTTERING APPARATUS / FUKAZAWA RYOSUKE; NODA HIROSHI; AZUMI TAKESHI (JP); Applicant DAINIPPON PRINTING CO LTD (JP). — Appl. No. JP20080001080; Filed 08.01.2008; Pub. Date 23.07.2009. 12 p.
9. **Pat. US 6149367**, Int. Cl. C23C14/34; C23C14/50; C23C14/56; F16H57/08; (IPC1-7): B65G49/07. End effector assembly for inclusion in a system for producing uniform deposits on a wafer / Robert George Begin (US); Applicant Applied Science and Technology, Inc. (US). — Appl. No. 08/999,936; Filed 15.04. 1998; Pub. Date 21.11.2000. 41 p.
10. **Pat. EP 0389820**, (DE), Int. Cl.⁵ C23C14/50. Device for transferring a workpiece into and out of a vacuum chamber / Kempf Stefan (DE) Applicant LEYBOLD AKTIENGESELLSCHAFT (DE). — Anmeldenummer 90104004.8; Anmeldetag 01.03.1990; Veröffentlichungstag der Anmeldung 03.10.1990. 8 p.
11. **Pat. US 6196154**, Int. Cl.⁷ C23C16/00; C23C14/56. Air lock for introducing substrates to and/or removing them from a treatment chamber / Tomas Baumecker; Helmut Grimm; Juergen Henrich; Klaus Michael; Gert Roedling; Juergen Ulrich (DE); Assignee Leybold Systems GmbH (DE). — Appl. No. 09/249,445; Filed 12.02.1999; Date of Patent 6.03.2001. 11 p.
12. **Pat. RU 2437964, МПК C23C 14/35, C23C 14/56** (2006.01). Подложкодержатель и установка для нанесения покрытий методом магнетронного распыления на его основе / Мирошникова В. Д., Жданов А. В., Мирошникова Т. Д., Лизюков Е. В., Смолин П. В. (RU); Мирошникова В. Д., Жданов А. В., Мирошникова Т. Д., Лизюков Е. В., Смолин П. В. (RU). — № 2010100488/02; заявл. 11.01.2010, опубл. 27.12.2011. Бюл. № 36. 25 с.
13. **Pat. RU 2543023, МПК C23C 14/35, C23C 14/56** (2006.01). Роторный подложкодержатель / Мирошникова В. Д., Шугалов А. В., Мирошникова Т. Д. (РФ); патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых" (ВлГУ) (RU). — № 2012141734/02; заявл. 01.10.2012, опубл. 27.02.2015. Бюл. № 6. 10 с.
14. **Pat. RU 2539487, МПК C23C 14/56, C23C 14/24** (2006.01). Способ нанесения покрытия магнетронным распылением и держатель подложек на его основе / Мирошникова В. Д., Шугалов А. В., Мирошникова Т. Д. (RU); патентообладатели Мирошникова В. Д., Шугалов А. В., Мирошникова Т. Д. (RU). — № 2012117996/02; заявл. 03.05.2012, опубл. 2.01.2015, Бюл. № 2. 15 с.
15. **Pat. RU 2673253, МПК C23C 14/35** (2006.01). Корончатый подложкодержатель / Мирошникова В. Д., Рязанов А. А., Мирошникова Т. Д., Шугалов А. В. (RU); заявители Мирошникова В. Д., Рязанов А. А., Мирошникова Т. Д., Шугалов А. В. (RU). — № 2017113599; заявл. 20.04.2017; опубл. 23.11.2018, Бюл. № 33. 20 с.
16. **Pat. RU 2308538, МПК C23C 14/38** (2006.01), **C23C 14/56** (2006.01). Установка для нанесения покрытий с периодической структурой методом магнетронного распыления / Агабеков Ю. В., Сутырин А. М., Федотов А. В. (RU); заявитель Общество с ограниченной ответственностью научно-производственная фирма "ЭЛАН-ПРАКТИК" (RU). — № 2006121379/02; заявл. 19.06.2006; опубл. 20.10.2007, Бюл. 29. 15 с.
17. **Мирошникова В. Д., Шугалов А. В., Мирошникова Т. Д.** Модульные конструкции подложкодержателей с позиционно-трансформируемыми подложконесущими поверхностями // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 8. С. 13—19.
18. **Pat. RU 2436665, МПК B23Q 3/155**. Автоматизированная система инструментального обеспечения / Мирошникова В. Д., Мирошникова Т. Д. (RU); патентообладатели Мирошникова В. Д., Мирошникова Т. Д. (RU). — № 2010121482/02; заявл. 26.05.2010; опубл. 20.12.2011, Бюл. № 35. 14 с.

V. D. Miroshnikova, Ph. D., vera.miroschnikowa@yandex.ru,

A. A. Ryazanov, Ph. D., Associate Professor, Design Engineer, New Technologies for Laser Thermal Hardening Co., Raduzhny, Vladimir Region, 600910, Russian Federation, aaryazanov@rambler.ru,

T. D. Miroshnikova, Ph. D., Associate Professor, Institute of Economics and management, Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletov, Vladimir, 600000, Russian Federation, tavem@ezhka.elcom. ru,

A. V. Shukalov, Engineer-Designer, BKN Project Co., St. Petersburg, 192102, Russian Federation, djsan@bk.ru

Corresponding author:

Miroshnikova Vera D., Ph. D., vera.miroschnikowa@yandex.ru

Development of the Ion-plasma Technologies on the Basis of the Castellate Substrate Holders

Received on February 15, 2019

Accepted on February 28, 2019

The authors present a new direction for development of the ion-plasma technologies on the basis of the modular substrate holders equipped with the substrate holder surfaces (SHS) with dynamic properties. Development of a series of the substrate holders with the increasing functionalities of SHS is a natural trend. It is dictated by the requirements of the balanced development of the magnetron systems. The substrate holders operated in the automatic mode should to serve as the internal operators for the organizational development of the ion-plasma technologies. SHS is considered as a powerful reserve for the morphological formation, the kinematics of the substrate holders, its basic component. On certain examples it is demonstrated in the "sleeping" state. In the presently available substrate holders SHS in the vacuum chamber is static: its elements have no opportunity to change their sizes and move autonomously. Staging of the development of the designs of the substrate holders in the direction of provision of the dynamic properties to SHS is presented. The procedure is shown for designing of the signs of a substrate holder with a combinatory construction of SHS inside the working space. A substrate holder with the varying forms and SHS sizes is called castellate. Its composition and displacements of its actuators allow us to create space with a dense grid of possible coordinates for arrangement of the substrates in the positions, optimal for formation of a qualitative coating — by the normal to the vector of the flow of the sputtered material, without overlapping by other substrates. In general, variability of the construction designs of SHS, carried out inside the working space of an operating magnetron installation, ensures a cumulative action of nine signs. Two designs of the castellate substrate holders were developed: one-cyclic and two-cyclic ones. These are perspective kinds of the substrate holders having a complex of properties: essential expansion of the options for placement of the surfaces of the substrates, and also the route and operational flexibility, and an effective convolution of SHS.

Keywords: magnetron sputtering system, substrate-bearing surface, structural-kinematic formula, combinatory constructions of the substrate-bearing surface

For citation:

Miroshnikova V. D., Ryazanov A. A., Miroshnikova T. D., Shukalov A. V. Development of the Ion-plasma Technologies on the Basis of the Castellate Substrate Holders, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 5, pp. 268–287.

DOI: 10.17587/nmst.21.268-287

Production of nanocoatings with the use of the gas-metal or gas-ceramic plasma is one of the most promising and problematic industries. In their limit both sides are characterized identically: they are unique. Development of the storming ion-plasma technological environment with essentially new properties generates numerous complex challenges, in particular, the ones connected with organization of its functioning in a closed space. Within several hours it is inaccessible to an external intervention. We are talking about a possibility of implementation of a set of methods, connected with manipulations with the substrates without an installation shutdown: a filigree fulfillment of all the requirements for positioning of various surfaces of a substrate in relation to the flows of the sputtered material, removal of the ready and installation of the next ones in the same best positions, optimal for formation of a qualitative coating; rearrangement of the substrates

from one target to another, bypassing the unnecessary ones in transit.

The internal operators of the organizational development of the ion-plasma technologies should be the automatically controlled substrate holders [1].

Aim of the work: increase of the efficiency of the technological environment of the magnetron installations on the basis of development of the substrate holder designs equipped with the substrate-holding surfaces (SHS) with dynamic properties.

List of tasks

1. To reveal opportunities of the modern designs of the substrate holders concerning operationalization of the substrates.
2. To present stages of development of the designs of the substrate holders supplied with SHS with dynamic properties.

3. To reveal the specific features for designing of the signs of a substrate holder with a combinatory construction of SHS inside the working space of a working magnetron installation (its morphology and kinematics).

4. To develop designs of the substrate holders with varying forms and sizes of SHS, the castellate substrate holders, and demonstrate their operation.

For solving of the set tasks the ideas were used concerning the kinematic method for formation of the surfaces, and basic provisions of the theory of the structure of the load-bearing surfaces [2].

Potentials of the modern substrate holder designs for operationalization by the substrates

In its general version the design of a substrate holder includes a holder, SHS with the elements of placement and fixation of the substrates, a drive (drives) for displacements. The displacements realized by a substrate holder may include:

— Technological displacements of the substrates in relation to the atomic flows sputtered from a target of a magnetron sputtering system (MSS);

— Displacements on the intermodular transfer of the substrates;

— Adjusting displacements connected with positioning of this or that surface of a substrate in relation to the flows of the deposited atoms.

In a quite big sector of installations for deposition of coatings by the method of the magnetron sputtering, the substrate holders realize only the technological displacements of the substrates in relation to MSS. Deposition of a coating requires one setting block (the technological bases of the substrate are not changed). In many respects this is a mastered development stage with a huge number of options for different, including large-size categories of products. Displacements of a substrate, rotary in relation to its axis and (or) the axis of a rotary platform with the other substrates placed on it, and (or) circular displacements in relation to MSS or the axis of a substrate holder, or forward displacements between MSS or along MSS via a closed trajectory, are only a part of the already realized set of options for displacements of the substrates under the influence of the atomic flows sputtered from the targets. As examples we will present patented rotary and other solutions of the magnetron installations from Italy [3], Russia [4–6], and Japan [7, 8].

Displacements on the intermodular transfer of the substrates is a function, not always available to a substrate holder. The set of solutions for its realization is often replenished with the devices, as a rule, original, but not satellites of the substrates — substrate holders. American company *Applied Science and Technology* for manipulation with the substrates patented a bimanous multilink robot. It is compactly placed in a transport module with a possibility of turning and displacement

of the substrates between the module of loading and the technological module [9]. For transfer of the substrates to the vacuum chamber and unloading of them from it Leybold AG company developed a device in the form of a rotary table with the top and lower disk substrate holders [10]. Leybold Systems GmbH (Germany) got a patent for "The air gate for introduction of the substrates and/or taking them out from the processing camera" — the step pumping is combined with a circular placement of the substrates in the gates on the periphery of the installation disk [11]. An example of the substrate holder realizing the intermodular transfer is the solution of the Japanese inventors — *Dainippon Printing Co., Ltd.* [8].

Among the urgent functions in development of the substrate holders is performance of the installation displacements for placement of each of the processed surfaces of the substrates into the position, optimal for formation of a qualitative coating, namely — via a normal to the vector of a flow of the sputtered material [12].

The demand for the function is high. In the evidential part we will give examples of the solutions of the world novelty.

1. Mass line production of the liquid crystal panels of G6 generation (1800 × 1500 mm size) for displays. The plasma coating of the simplest in form rectangular panel demands two installation displacements: placement in the vertical position and placement in the horizontal position (the plasma source is at the side of the substrate). The node of the substrate holder and the magnetron installation have been patented [8].

2. Mass line production of the quick-selling goods — capacities for drinks. The product is slightly more complex. A coating is only for the external surface of the body and nose section. The manufacturing techniques for the coating envisages three installation displacements (over the plasma source): placement in the horizontal position with a possibility of its rotation around its own axis; placement in the vertical position with the nose section down (to the plasma source); and again placement in the horizontal position with a possibility of its rotation around its own axis. The manufacturing version has been patented [11].

In both cases for thousands of products one rigid algorithm for performance of the installation displacements of the substrate holder was developed.

But, the mass production is only 20 %. The rest are unequal 50...90 thousand products, various by their design and technological parameters.

Stages of development of the designs of the substrate holders equipped with SHS with the dynamic properties

What kind of a substrate holder should it be to respond flexibly to the conditions of the medium and

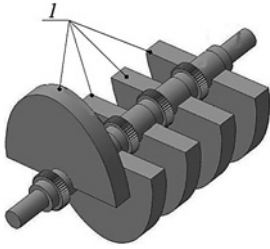
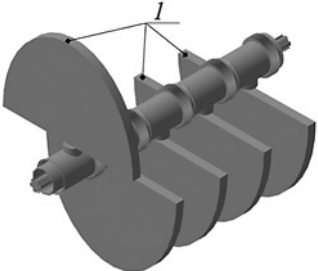
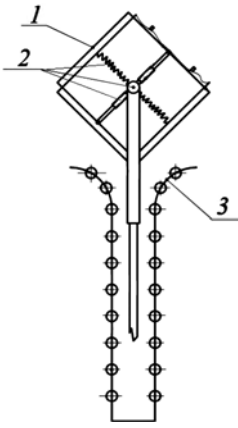
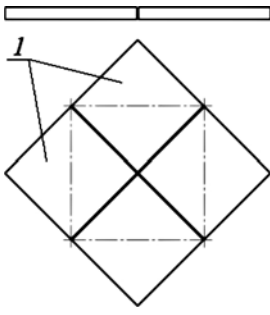
small-scale types of productions, and to the requirements of the experimental laboratories?

Research in this direction is conducted systematically. *As a powerful reserve for the morphology and kind-formation of the designs of the substrate holders it is necessary to consider its basic component — the substrate-bearing surface.* So far it is in the "sleeping" state. In the functioning designs of the substrate holders SHS in the vacuum chamber is static: it does not change its form and size. The orientation of the research works was defined by the vector of development of the substrate holders, including SHS with the dynamic properties. The table below presents the stages of the process on the interconnected examples of the patented designs of the substrate holders.

Stage 1. SHS is dismembered into sections — nozzles. They are situated on one axis defining the optimal arrangement of the substrates in relation to the vector

of the flow of the deposited atoms, at that, they have a possibility of an autonomous transition from the expectation position to the working position. Each nozzle solves its technological problem. Component of a group routing of the substrates with various requirements to the nanocoatings in the conditions of one load of the chamber is introduced in the technological environment of the magnetron sputtering developed on the basis of two or four MSS [16]. At the heart of the solution is a modular design of a substrate holder and placement of the position of expectation in close proximity to the working position. The new specific design of the substrate holder integrated the subkinds, differing by the constructive solution of SHS: rotor and frame substrate holders. The solution is intended for receiving coatings for such products as stamps, casting molds, which determine the borders of its application.

Stages of development of the designs of the substrate holders, equipped with SHS with the dynamic properties

1	2
<p><i>At the set moment the necessary substrate, comes to the position of sputtering of the required material with the set time of the dwell. In the sketch is the substrate holder made as a modular one by the quantity of sections 1 SHS. The sections are mounted on the rotary holders supplied with independent turn drives [12].</i></p>  <p><i>It is intended for receiving of nanocoatings on the products with a unilateral working surface.</i></p>	<p><i>The principles of flexible routing are realized for the substrates with various quantities of the coating surfaces. In the sketch is a rotor of the substrate holder with sections 1 SHS mounted on hatches as rotary in relation to the rotary holders [13].</i></p>  <p><i>The values of the dimensional characteristics of SHS in the position for processing and in the position of expectation are identical.</i></p>
3	4
<p><i>The position-transformed SHS, when it comes to the working position, opens and makes turns, and when it returns to the position of expectation it folds, being transformed into a flat design. The length of the holder is reduced sharply [14]. In the sketch is opening of SHS 1 equipped with the opening mechanism 2 at the moment, when it leaves the guides 3.</i></p>  <p><i>Folding of a one dimension characteristic of the position of expectation</i></p>	<p><i>Tasks of the stage:</i> — development of SHS with a varying form; — compaction of SHS [15].</p> <p><i>Development prerequisites:</i> Solution of an automated system for tool support (ASTS), in which the geometrical construction of the section load-bearing surface (LBS) is combined successfully with the effective scheme of its compaction both by height, and in the horizontal plane. In the sketch is LBS 1 ASTS made in the section version [18].</p> 

Stage 2. Each nozzle got an opportunity to rotate around its (vertical) axis. Two indisputable qualities were combined — a nozzle exit from the expectation position to the working position, and the optimal access of the working environment to most surfaces of the substrate. This advantage of the magnetron systems was previously inaccessible. In relation to the prototype the capacity of the nozzle-rotor increases up to 2 times. And the scope of applications extends repeatedly.

Stage 3. The question of differentiation of the sizes of the space occupied by SHS in the working position and the position of expectation was raised. In the working position — the maximal dispersal of SHS in order to avoid overlapping of the surfaces of the substrates. In the position of expectation SHS must be "most compressed" in order to occupy the minimal space. For solving of the task a new type of the modular design of the substrate holder from the position-transformed SHS was developed. Opening SHS occupies a large volume, forms friable environment, suitable for a free penetration of atoms. In the common flow each substrate moves via its own trajectory, not crossing with the other substrates, or repeats the trajectory of the previous substrate with a certain period of time. A dot and a linear schemes were developed for dispersal of the locations of the substrates [17]. In the expectation position the holder of the nozzle frame descends, smoothly folding, via the vertical guides. The scheme of the convolution, offered by the solution, "nullifies" the size of one diagonal of the cross section of the tetrahedral prism, transforming it into a flat design. This allows us to reduce sharply the length of the holder with the substrate holders.

Crosswise folding of a hinged design is connected with an increase of its height by value $b = 2c - d$, where c — height of a side of SHS, d — size of the diagonal cross section of the prism. This somewhat reduces the efficiency of the convolution: to a less degree the volume occupied by the substrate holder in the expectation position is changed.

Stage 4. Solutions for the two tasks (within the possible limits) should be integrated in one design. We should put together two maxima to see SHS opening in various compositions of the sides and versions of their placement, and its convolution "nullifying" the SHS height. The first task goes via individualization of the requirements and, therefore, expansion of the opportunities of the substrate holder, the second one — via miniaturization of the function carrier.

The prerequisites for development of the solution are available. An automated system of tool supply (ASTS) was developed by the authors for the flexible production systems of the machine-building production [18]. The shop of the ASTS tools is made rotary in relation to the vertical axis. LBS of the shop is made in the form of a square and is located in the horizontal plane. At that, it is dismembered by the symmetry axes

into the sections, established in the supports with a possibility of turning to the right angle in relation to the horizontal axes of a swing. Sections in the starting position form one plain horizontal surface, and in the working situation — castellate LBS. During a convolution by height the other dimensional characteristics of LBS preserve their value. The turn drive of the sections is common, and the displacement of the sections is synchronous.

Designing of the signs of a substrate holder with a combinatory construction of SHS inside the working space

The composition and displacements of the actuating mechanisms of the castellate substrate holder should allow us to create space with a dense grid of possible coordinates of arrangement of the substrates in the positions, optimal for formation of a qualitative coating — by the normal to the vector of the flow of the sputtered material, without overlapping by other substrates.

Selection of the signs for development of SHS with the required composition of properties, as it follows from the table, predetermined the solution of LBS ASTS, patented earlier by the authors [18]. The solution meets the quality requirements for deposition of coatings on the surfaces of a quite big list of parts with various geometries.

The morphology of SHS is presented from the positions of the structural-kinematic method for formation of the surfaces [3]. A surface is considered the as a geometrical image (trace) received by the integrating displacements of the generatrix in space. The *integer* (Latin — whole) root in definition of the displacements indicates to the process conducting to the condition of coherence of the positions of the SHS generatrix into a whole thing.

By the type of the generatrix the basic sign "The level of integration of SHS" is defined. The generatrix of the first level of integration is the place for location and fixation of one substrate or the space-planning element (SPE). For simplification of the description, SHS SPE is presented in the form of a material point. In this case the generatrix of the second level of integration is the line; the third level of integration — the plane, the fourth level — the volume, the fifth level — a set of volumes, etc. The alternative manifestations of the sign "The level of integration of SHS" are the types of the structurization systems, qualitatively differing from each other, and within which the properties and functionalities of SHS are formed.

In the prototype of LBS of the third level of integration.

Depending on the selection of the design of SHS section of the modular substrate holder it can represent

structural and kinematic formation, varying by the composition of its components, for example:

— First level of integration (on each module there is a place for one substrate)

$$(O_{YRI=I})[EX_A],$$

— Second level of integration

$$(O_{YRI=I})[RW_y(\varphi)] \rightarrow (O_{YRI=II})[EX_A],$$

— Third level of integration

$$(O_{YRI=I})[FY] \rightarrow (O_{YRI=II})[RW_y(\varphi)] \rightarrow (O_{YRI=III})[EX_A].$$

Within the rounded parentheses the geometrical part of the determinant of the surface — generatrix is presented. In the square brackets an algorithmic part is specified. It includes displacements of the generatrix at the level of integration.

For presentation of the components of the SHS generatrix the following designations are used:

$YRI = j - j$ — integration level;

$O_{YRI=j}$ — the generatrix of j — integration level;

\mathbf{Y} , \mathbf{W}_y — vectors of movement of the generatrix at the level of integration: forward in the direction of axis OY and rotary in relation to axis OY ;

F , R , E — number of the discrete displacements of the generatrix in the chosen direction;

X_A — autonomous placement of the generatrices on the vector of movement of \mathbf{X} .

In SHS of the second level of integration the section is SPE (the location and fixation of one substrate). As is shown in the structural-kinematic formula, SPE performs R -number of steps — discrete displacements — turns to the angle equal to 90° , around OY axis. SHS is a trace of the generatrix. At $R = 4$ we get a four-section SHS.

During selection of the form and quantity of the sections it is necessary to take into account that in the folded state of SHS, during placement of the sections in one horizontal plane at a contact of their tops and the sides adjoining to them, we should get a dense placing. A section can be square, rhombic, triangular or represent a sector of a disk.

In SHS of the third level of integration the section is a form-setting component with a simple structure — a set of several locations and fixations of the substrates ordered by the integrating displacement of SPE. In the presented version a linear placement of the substrates in the direction of OY axis is specified. In both versions the degree of the circular (rotary) movement of \mathbf{W}_y of the generatrix in relation to OY axis is fixed by the set number of sections.

The multiplier of R sets the number of the operators (sections) of the combinatory construction of SHS, forming a set of \mathbf{C} , at the same time, the rotary move-

ment in relation to axis of the substrate holder of $\mathbf{W}_y(\varphi)$ sets their arrangement in the vacuum chamber.

Each section is equipped with an independent drive for a displacement and a switch of displacements (the motorized part of the substrate holder).

The multiplier of E on the integrating movement of $X_{(A)}$ in both structural-kinematic formulas points to a multiple placement of the generatrix of the second and, respectively, the third level of integration along OX axis. An autonomous placement of the generatrices of $X_{(A)}$ indicates to a modular construction of SHS and, respectively modular construction of the design of the substrate holder. Its potentials increase many times.

Let us reveal the kinematics of the presented SHS versions — the basis for development of the designs of the substrate holder, the most varied versions of drives for the actuators. Opening of SHS sections begins from its center by raising of the tops and turn of the sections in the direction from the center to the periphery — from the horizontal position to the vertical one — the processing position, with a possible continuation of advancement of the sections into the processing position.

For a possibility of positioning of the substrates in relation to the vector of the flow of the sputtered material, SHS can be fixed in the substrate holder with a possibility of making discrete turns in relation to the vertical axis of the substrate holder and dwell by time of dispersion of a target in the set positions (the first manufacturing version) or with a possibility of a rise from the expectation position into the position of processing, making discrete turns in relation to the vertical axis of the substrate holder in the opened or folded state, of the dwell in the set positions and return to the expectation position (the second manufacturing version).

SHS can work both in the specified mode of performance of the installation displacements of the sections, and in the mode of the continuous circular technological displacements in relation to MSS.

Thus, each section in the substrate holder, depending on its version, carries out a certain sequence of the installation and technological displacements:

1) First manufacturing version (one-cyclic technology):

⇒ Autonomous, discrete — opening of SHS:

— Rotary in relation to the horizontal axis, ranging from the horizontal position to the vertical one;

— Forward — advancement of the sections;

⇒ General, SHS in the opened state:

— Rotary, continuous in relation to the vertical axis;

— Rotary, discrete in relation to the vertical axis;

⇒ Autonomous, discrete — convolution of SHS:

— Rotary in relation to the horizontal axis, ranging from the vertical position to the horizontal one;

— Forward (return of the section to the initial position);

2) Second manufacturing version (two-cyclic technology):

⇒ Common (SHS with the substrates placed on it in the folded state):

— Forward, from the expectation position into the processing position;

— Rotary, continuous in relation to the vertical axis;

— Rotary, discrete in relation to the vertical axis;

⇒ Autonomous, discrete — opening of SHS:

— Rotary in relation to the horizontal axis ranging from the horizontal position to the vertical one;

— Forward (discrete) — advancement of the sections;

⇒ Common, SHS in the opened state:

— Rotary, continuous in relation to the vertical axis;

— Rotary, discrete in relation to the vertical axis;

⇒ Autonomous, discrete (convolution of SHS):

— Rotary in relation to the horizontal axis ranging from the vertical position to the horizontal one;

— Forward (return of the section into the initial position)

⇒ Common, SHS in the folded state:

— Forward, from the processing position into the expectation position.

The specified signs create the required SHS properties, on their basis it varies, changing the sizes and the form. Excerpts from the formula of the invention "Castellate substrate holder" [15]:

— "SHS is made with a possibility of opening, folding and fixation in any intermediate position";

— "Each SHS section is fixed with a possibility... of displacement... in the set processing position with formation of a castellate SHS in the set version of combination of the used sections and the set version of the degree of their fixed displacements, including its vertical position".

The technical solution for SHS, each of the signs of which accepts various values from a certain area, is presented in a formula of extremely compressed verbal form of the model of the combinatory analysis — "with formation of a castellate SHS in the set version of combination of the used sections and the set version of the degree of their fixed displacements". This is the model of SHS construction and receiving of the required SHS version.

In general, the variability of the design solutions of SHS, which are applied in the working space of the operating magnetron installation, ensure cumulative action of nine signs:

— Number of SHS sections (set of $\mathbf{C} = \{c_1, c_2, c_3, c_4\}$),

— Versions of combinations of the used SHS sections. An alternative number of the possible states of the

sign "Versions of combinations of the sections used in the technological adjustment" is set below by boolean:

$$\mathcal{P}(\mathbf{C}) = \{\{c_1\}, \{c_2\}, \{c_3\}, \{c_4\}, \{c_1, c_2\}, \{c_1, c_3\}, \{c_1, c_4\}, \{c_2, c_3\}, \{c_2, c_4\}, \{c_3, c_4\}, \{c_1, c_2, c_3\}, \{c_1, c_2, c_4\}, \{c_1, c_3, c_4\}, \{c_2, c_3, c_4\}, \{c_1, c_2, c_3, c_4\}\}.$$

— Types of installation displacements of the SHS sections;

— Types of installation displacements of SHS;

— Number of the dimensions of the fixed rotary displacements of the sections in relation to the horizontal axis ranging from the horizontal position to the vertical one — $\mathbf{W}_X(\varphi)$ during its opening;

— number of the dimensions of the fixed forward displacements of the sections (advancement and return) in relation to the vertical axis — Y ;

— number of the dimensions of the fixed rotary displacements of SHS in relation to the vertical axis during positioning of the sections (substrates) in relation to the target — $\mathbf{W}_y(\varphi)$;

— A possibility of the reciprocating displacements of SHS from the expectation position into the processing position in the folded state. It is not only an additional possibility for positioning of the substrates in the horizontal position, but also an additional degree of displacement of SHS to the working position;

— Number of the modules of the substrate holder.

Designs and operation of the castellate substrate holders

The castellate substrate holder continues the series of the modular substrate holders equipped with SHS with dynamic properties, see [12–14].

Below we present two versions of the designs of a castellate substrate holder: a one-cyclic and a two-cyclic versions, incorporating one module each.

In the castellate one-cyclic substrate holder the SHS frame bearing is fixed with a possibility of a cycle of rotary displacements of it in relation to the vertical axis in the position of processing, and is supplied with a controlled drive for the rotary displacements.

In the castellate two-cyclic substrate holder the frame bearing SHS is fixed so that it allows a cycle of rotary displacements in the position of processing and a cycle of forward displacements in relation to the vertical axis — a rise from the expectation position into the position of processing and return to the expectation position, and it is supplied with, respectively, two controlled drives — for the rotary displacements and for the forward displacements.

As examples, different versions of SHS are used in the substrate holders:

— Versions of the use of the disk and square SHS are shown in the one-cyclic substrate holder;

— In the two-cyclic substrate holder SHS is made in the form of a square.

The design of a castellate one-cyclic substrate holder is shown in fig. 1–3.

Substrate holder 1 includes a rotating around the vertical axis frame 2, on which section SHS 3 is mounted with the controlled independent drives of displacements 8 and autonomous switches of displacements of sections 4 and also the turn drive of the frame.

SHS in the folded state is a disk with four sections and is fixed on a frame with a possibility of opening and folding in the processing position and it can also stay folded in the expectation position.

Each section is established on guides 5 of coulisse 6 with a possibility of a forward movement along the guides of the coulisse and for this purpose it is supplied with a controlled autonomous drive for displacements and an autonomous switch for displacements. For restriction of the forward movement of the section the stop members are envisaged.

The coulisses of the sections are placed in the frame with a possibility of an autonomous turn around the horizontal motionless axes 7 ranging from the horizontal position of the coulisse up to the vertical one. The turn of each coulisse including the section placed on it is also limited by the stop members.

Case 9 of the autonomous drive for movement of each SHS section (see fig. 1 and fig. 2) is pivotally fixed in the frame. Electric motor 10 is placed on the case. Cogwheel 12 is installed in the case with a possibility of rotation in the bearing 11 and it has a threaded hole with the running screw 13 in it. On the shaft of the electric motor, gear wheel 14 is installed in engagement with a cogwheel. The end of the running screw is pivotally connected with the section.

For a possibility of positioning of the sections in relation to the vector of the flow of the sputtered material, the design of the castellate substrate holder envisages a turn drive for the frame equipped with the angular turn sensor and the dwell sensor. The turn drive can work both in the specified mode of the installation displacements of the sections, and in the mode of a continuous rotation of the frame in relation to the vertical axis of the substrate holder.

The autonomous switch 15 for displacements of SHS section of the substrate holder is shown in fig. 3 on the example of a square SHS.

The switch is made in the form of the roller 16 established with the guaranteed gap in groove 17 of the coulisse with a possibility of entering holes 18 and 19 in the extreme (boundary the turn range) positions of the section: in the vertical position — hole 19 made in the coulisse axis. In the horizontal or intermediate position — hole 18 made in the section.

Control of operation of the castellate substrate holder is implemented by the control system of the magnetron installation. In the position of expectation, the sections of the substrate holder with the substrates

placed and fixed on them, are in the horizontal position (see fig. 3, a).

For opening of SHS section by a signal of the control system the electric motor of the autonomous drive for movement of the section turns on, at that, rotation of the shaft is transferred to a cogwheel by means of the gear wheel fixed on it. As a result, the running screw moves up from the case of the drive for opening of SHS. In this position of the section the roller of the switch is in the hole of the section and blocks its forward movement in relation to the coulisse, therefore, during the forward movement of the running screw the coulisse only turns around the axis (see fig. 3, b).

When the coulisse reaches the vertical position (see fig. 3, c) — up to the contact with the stop member, its further turn becomes impossible. At that, the groove with the roller of the switch, which is in it, appears opposite to the hole made in the axis. As a result, the further movement of the running screw upwards leads to a displacement of the section up along the coulisse guides. The place of the hole is taken by the flat surface of the section which is pushing the roller out. As a result, the roller of the switch moves into the coulisse groove from the section hole to the axis hole (see fig. 3, d). Thus, there is an automatic switching of the movement of the section. The turn of the coulisse in relation to the axis is blocked, but the forward movement of the section in the coulisse guides becomes possible. At the further advancement upwards of the running screw the section continues its movement in the coulisse guides up to the stop member in the top position and takes the vertical position in the processing position. At that, opening of SHS section of the substrate holder comes to the end.

In relation to the target, the section is positioned due to a turn of the frame around its vertical axis to any set angular movement. The most demanded positions are: position I — angular movement of the section in relation to the target equal to 0° ; position II — 90° ; position III — 180° ; position IV — 270° . The dwell time of the section in each position is defined by the technological indications and is controlled by the sensor.

For folding of SHS section by a signal of the control system the electric motor of the autonomous drive for movement of section turns on. At that, the rotation of the shaft of the electric motor is transferred to the cogwheel through the gear wheel. Due to the reverse of the electric motor the cogwheel rotates in the opposite direction and the running screw moves down in the case of the drive for movement of SHS section. In this situation a turn of the coulisse in relation to the axis is blocked by the switch roller, which is in the axis hole (see fig. 3, d) owing to what the down movement of the running screw leads to down displacement of the section in the coulisse guides. During movement of the section to the lower position up to the stop member, its further displacement in the coulisse guides becomes

impossible (see fig. 3, *c*). At that, the groove with the roller of the switch in it appears opposite to the hole made in the section. As a result, the further movement of the running screw down leads to a turn of the coulisse around its axis. At that, the roller of the switch moves to the coulisse groove from the axis hole to the section hole, i. e. there is reverse automatic switching of the displacement, therefore the forward movement of the section in the guides of the coulisse is blocked, but a turn of the coulisse in relation to the axis becomes possible. At the further movement down of the running screw the coulisse will continue to turn around the axis to the horizontal position up to the stop (see fig. 3, *a*), inside the frame — in one horizontal plane with the other sections, up to a contact of their tops and the adjoining sides. When all the sections fold, a dense stacking of SHS is formed.

The control of the opening and the convolution of SHS is based on the general principle which boils down to the fact that a simultaneous movement of the section along the guides of the coulisse and a turn of the coulisse around its axis are impossible. Either the coulisse can turn around its axis, but, at that, the section in the extreme — horizontal position is blocked from the forward movement in the coulisse guides. Or the section can move forward along the coulisse guides, but, at that, the coulisse in the vertical position is blocked from a turn around its axis.

The rotor component of the section displacements ensures completely placement of various vertical surfaces of the substrates by the normal to the vector of the flow of the sputtered material.

Change of the vector of inclination of the section ensures placement by the normal to the vector of the flow of the sputtered material of various substrates, close to the horizontal arrangement of the surfaces.

The castellate two-cyclic substrate holder *I* is presented in fig. 4.

SHS of the substrate holder is made in the form of a square, dismembered in sections, by the symmetry axes and mounted on the frame with a possibility of its opening, folding and preserving in the folded state in the position for processing, and also staying in the folded state for the position of expectation. For this purpose, the drive rotary frame is made with a possibility of forward movement in relation to the vertical axis: raising of SHS to the processing position from the position of expectation and its return to the expectation position.

For the forward displacements of the frame of the castellate substrate holder in relation to the vertical axes, its designs envisages drive *21*.

The drive includes the lifting plate *22* bearing the substrate holder fixed with a possibility of rising and lowering by vertical guides *23*. The guides are mounted on the basis *24*. Running screws *25* are rigidly fixed on the lifting plate. In the basis nuts *26* are installed with

a possibility of rotation in relation to the vertical axes and forming screw-gears with the screws. On the external surface of the nuts asterisks *27* are made. By means of chain *28* they are connected to asterisk *29* established on the shaft *30* of the electric motor *31* into a chain gear. The electric motor is rigidly fixed on the basis mounted in case *32* of the substrate holder.

The rest of the design of the two-cyclic castellate substrate holder is similar to the design of a one-cyclic castellate substrate holder.

For operation of the castellate two-cyclic substrate holder, a sequence of the opened and folded SHS is set. If the technology for deposition of coatings envisages as the first step coming to the position of processing of the folded SHS, then at the command of the control system, first, the cycle of raising of the frame is carried out. When the electric motor is turned on by means of the asterisk established on the shaft and the chain, the movement is transferred to the asterisks made on the external surfaces of the nuts of the screw gears. At that, the nuts get the unidirectional rotation, and the running screws move up, putting the plate forward along the guides. As a result, SHS in the folded state rises from the expectation position to the processing position. After that the cycle of turning of the frame is carried out: the turn drive for positioning of the sections in relation to MSS turns on. The cycle ensures completely placement of the horizontal surfaces of the substrates, for example, their lower, top and lateral sides by the normal to the vector of the flow of the sputtered material, which creates certain advantages in comparison with a one-cyclic substrate holder. After completion of the deposition of a coating to the folded SHS the command is sent for its opening (a detailed description of the operation of the actuators is given above, see one-cyclic substrate holder). The motor reverse returns SHS from the processing position to the expectation position.

Conclusion

A set of the distinctive signs of the castellate substrate holder, in general, ensures an increase of the efficiency of the technological environment of the magnetron installations. This is a promising kind of the modular designs of the substrate holders having a complex of properties: essential expansion of the versions of placement of the surfaces of the substrates in the positions, optimal for formation of a qualitative coating, a route flexibility, an operational flexibility, and a possibility of an effective convolution of SHS.

Most effective is the use of the one-cyclic and two-cyclic castellate substrate holders in the technological environment of the magnetron sputtering developed on the basis of two or four MSS for receiving various versions of coatings on the substrates in the conditions of one loading of the vacuum chamber. A combination of the new and basic signs, specific for the designs of the

modular substrate holders, provides higher functionality to the castellate substrate holders in comparison with earlier patented designs of them.

By the efficiency of the compaction schemes of SHS the castellate substrate holders surpass significantly the earlier patented designs of the modular substrate holders. Effectiveness of the scheme of convolution of SHS offered in the solution is defined in the first approximation by the relation of the height of castellate SHS in the processing position (the section diagonal size) to the height of the folded SHS in the expectation position (thickness of the basic surface of SHS). The opportunities of the effective compaction of SHS are used in many ways. In a two-cyclic substrate holder a folded SHS is used as the most effective means for the optimal placement of the substrates in the processing position for deposition of coatings on their lower and top sides.

References

1. **Miroshnikova V. D., Shugalov A. V., Miroshnikova T. D.** Osnovy gibkoj marshrutizacii podlozhek v ionno-plazmennyyh tekhnologiyah, *Ehlektronnaya i material'naya: Materialy HKH-j Mezhdunar. konf. Nacional'no-issledovatel'skij universitet MEHI*. — Moscow, Al'yansinvest, 2012, pp. 623—629. (in Russian).
2. **Miroshnikova V. D., Miroshnikova T. D.** Koncepciya ehlementarnykh priznakov, kak osnova teorii stroeniya skladskih i nakopitel'nykh sistem s yacheistoj strukturoj, *Vestnik mashinostroeniya*, no. 10, 2012, pp. 76—81. (in Russian).
3. **Pat. WO 03/076684, (IT)**, Int. Cl.⁷ C23C14/56. SYSTEM FOR VACUUM METALLIZATION OF OBJECTS TREATED IN BATCHES / CENI, Mario; FANFANI, Stefano (IT); Applicant GALILEO VACUUM SYSTEM S R L (IT); CENI, Mario; FANFANI, Stefano (IT); — Appl. No. PGT/IT03/00131; Filed 08.03.2002; Date of Patent 18.09.2003. 32 p.
4. **Pat. RU 2280097, MPK C23C 14/35** (2006.01). Magnetrionnoe raspilytel'noe ustrojstvo / Kuz'min O. S., Kosicyn L. G., Lihachyov V. N. (RU); zavayitel' Institut fiziki prochnosti i materialovedeniya Sibirskoe otdelenie Rossijskoj Akademii Nauk (IFPM SO RAN) (RU), Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennost'yu "Nauchno-proizvodstvennoe predpriyatie "Vakuumnye ionno-plazmennyye tekhnologii" (NPP "VIP-Tekhnologii") (RU). — № 2004106036/02; zavayavl. 01.03.2004; opubl. 20.07.2006, Byul. 20. 6 p.
5. **Pat. RU 1 644 553, MPK S23S 14/50** (1990). Vakuumnaya ustanovka dlya naneseniya pokrytij / Korovkin A. V., Usachev G. A., Polunina O. V. (RU); zavayitel' Volzhskoe ob'edinenie po proizvodstvu avtomobilej (RU). — № 4764153/21; zavayavl. 02.08.1989; opubl. 15.10.1994, Byul. 27. 2 p.
6. **Pat. RU 2058427, MPK S23S 14/34** (1995.01). Vakuumnaya ustanovka dlya naneseniya pokrytij / Deryugin A. I., Zhalilov R. H., Rogov A. V. (RU); zavayitel' Deryugin A. I., Zhalilov R. H., Rogov A. V. (RU). — № 93031133/02; zavayavl. 01.06. 1993; opubl. 20.04.1996, Byul. 11. 9 p.
7. **Pat. US 2008178796, Int. Cl. C23C14/50** (2006.01). FILM FORMING APPARATUS / Shinji Furukawa; Masahiro Shibamoto (JP); Applicant ANELVA Corporation (JP). — Appl. No. 12/031,474; Filed 14.02.2008; Pub. Date 31.06.2008. 30 p.
8. **Pat. JP 2009161817, Int. Cl. C23C14/34; C23C14/50.** SUBSTRATE HOLDER PART AND SPUTTERING APPARATUS / FUKAZAWA RYOSUKE; NODA HIROSHI; AZUMI TAKESHI (JP); Applicant DAINIPPON PRINTING CO LTD (JP). — Appl. No. JP20080001080; Filed 08.01.2008; Pub. Date 23.07.2009. 12 p.
9. **Pat. US 6149367, Int. Cl. C23C14/34; C23C14/50; C23C14/56; F16H57/08;** (IPC1-7): B65G49/07. End effector assembly for inclusion in a system for producing uniform deposits on a wafer / Robert George Begin (US); Applicant Applied Science and Technology, Inc. (US). — Appl. No. 08/999,936; Filed 15.04. 1998; Pub. Date 21.11.2000. 41 p.
10. **Pat. EP 0389820, (DE), Int. Cl.⁵ C23C14/50.** Device for transferring a workpiece into and out of a vacuum chamber / Kempf Stefan (DE) Applicant LEYBOLD AKTIENGESSELLSCHAFT (DE). — Anmeldenummer 90104004.8; Anmeldetag 01.03.1990; Veröffentlichungstag der Anmeldung 03.10.1990. 8 p.
11. **Pat. US 6196154, Int. Cl.⁷ C23C16/00; C23C14/56.** Air lock for introducing substrates to and/or removing them from a treatment chamber / Tomas Baumecker; Helmut Grimm; Juergen Henrich; Klaus Michael; Gert Roedling; Juergen Ulrich (DE); Assignee Leybold Systems GmbH (DE). — Appl. No. 09/249,445; Filed 12.02.1999; Date of Patent 6.03.2001. 11 p.
12. **Pat. RU 2437964, MPK S23S 14/35, S23S 14/56** (2006.01). Podlozhkoderzhatel' i ustanovka dlya naneseniya pokrytij metodom magnetronnogo raspilyeniya na ego osnove / Miroshnikova V. D., Zhdanov A. V., Miroshnikova T. D., Lizyukov E. V., Smolin P. V. (RF); Miroshnikova V. D., Zhdanov A. V., Miroshnikova T. D., Lizyukov E. V., Smolin P. V. (RF). — № 2010100488/02; zavayavl. 11.01.2010, opubl. 27.12.2011, Byul. № 36. 25 p. (in Russian).
13. **Pat. RU 2543023, MPK S23S 14/35, S23S 14/56** (2006.01). Rotornyj podlozhkoderzhatel' / Miroshnikova V. D., Shugalov A. V., Miroshnikova T. D. (RF); patentoobladatel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshogo professional'nogo obrazovaniya "Vladimirskij gosudarstvennyj universitet imeni Aleksandra Grigor'evicha i Nikolaya Grigor'evicha Stoletovyh" (VIGU) (RU). — № 2012141734/02; zavayavl. 01.10.2012, opubl. 27.02.2015, Byul. № 6. 10 p. (in Russian).
14. **Pat. RU 2539487, MPK S23S 14/56, S23S 14/24** (2006.01). Sposob naneseniya pokrytiya magnetronnym raspilyeniem i derzhatel' podlozhek na ego osnove / Miroshnikova V. D., Shugalov A. V., Miroshnikova T. D. (RF); patentoobladateli Miroshnikova V. D., Shugalov A. V., Miroshnikova T. D. (RF). — № 2012117996/02; zavayavl. 03.05.2012, opubl. 2.01.2015, Byul. № 2. 15 p. (in Russian).
15. **Pat. RU 2673253, MPK S23S 14/35** (2006.01). Koronchatyj podlozhkoderzhatel' / Miroshnikova V. D., Ryazanov A. A., Miroshnikova T. D., Shugalov A. V. (RF); zavayitel' Miroshnikova V. D., Ryazanov A. A., Miroshnikova T. D., Shugalov A. V. (RF). — № 2017113599; Miroshnikova V. D., Ryazanov A. A., Miroshnikova T. D., Shugalov A. V.; zavayavl. 20.04.2017; opubl. 23.11.2018, Byul. № 33. 20 p. (in Russian).
16. **Pat. RU 2308538, MPK S23S 14/38** (2006.01), **S23S 14/56** (2006.01). Ustanovka dlya naneseniya pokrytij s periodicheskoj strukturoj metodom magnetronnogo raspilyeniya / Agabekov Yu. V., Sutyurin A. M., Fedotov A. V. (RU); zavayitel' Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennost'yu nauchno-proizvodstvennaya firma "EHLAN-PRAKTIK" (RU). — № 2006121379/02; zavayavl. 19.06.2006; opubl. 20.10.2007, Byul. 29. 15 p.
17. **Miroshnikova V. D., Shugalov A. V., Miroshnikova T. D.** Modul'nye konstrukcii podlozhkoderzhatel'ej s pozicionno-transformiruemymi podlozhkonesushchimi poverhnostyami, *Avtomatizaciya i sovremennyye tekhnologii*, no. 8, 2014, pp. 13—19.
18. **Pat. RU 2436665, MPK B23Q 3/155.** Avtomatizirovannaya sistema instrumental'nogo obespecheniya / Miroshnikova V. D., Miroshnikova T. D. (RF); patentoobladateli Miroshnikova V. D., Miroshnikova T. D. (RF). — № 2010121482/02; zavayavl. 26.05.2010, opubl. 20.12.2011, Byul. № 35. 14 p.

Н. Ф. Карушкин¹, канд. техн. наук, нач. отд., И. А. Обухов², д-р физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,
Е. А. Смирнова³, аспирант,

¹ Государственное предприятие "Научно-исследовательский институт "Орион", г. Киев,

² Научно-производственная организация "Синергетика", Россия, 115419, г. Москва, iao001@mail.ru,

³ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, elizaveta.a.smirnova@yandex.ru

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ КОМПОНЕНТЫ И УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ В КОРОТКОВОЛНОВОЙ ЧАСТИ СВЧ ДИАПАЗОНА. ЧАСТЬ III

Поступила в редакцию 05.10.2018

Проанализирован уровень развития элементной базы электронной техники на основе полупроводниковых и волноведущих электродинамических структур в коротковолновой части СВЧ диапазона. Рассмотрены особенности конструкций отдельных компонентов и устройств, таких как генераторы, усилители, умножители частоты, измерители мощности, линии передачи и устройства для модуляции электромагнитных волн с использованием $p-i-n$ -структур. Описаны практические применения компонентов и устройств в коротковолновой части СВЧ диапазона.

Ключевые слова: терагерцовый диапазон, генераторы, детекторы, усилители, $p-i-n$ -модуляторы, линии передачи, радиовидение, умножители частоты, модули СВЧ, РЛС, искусственный интеллект

Управляющие устройства — модуляторы

Для управления уровнем мощности и модуляции СВЧ сигналов используют $p-i-n$ -диоды с сосредоточенными и распределенными параметрами. Известные быстродействующие амплитудные модуляторы, способные изменять уровни мощности за единицы наносекунд, выполняют с использованием $p-i-n$ -диодов с сосредоточенными параметрами и имеющими толщину i -области 3...10 мкм [1, 2].

Модуляторы инверсного типа также обеспечивают время переключения в единицы наносекунд. В качестве переключаемых элементов использованы $p-i-n$ -структуры, выполненные по мезотехнологии и смонтированные в рубиновые часовые камни, металлизированные по торцам [3].

Корпусирование диодов повышает эксплуатационные характеристики электронных компонентов, но ограничивает их применение в коротковолновой части СВЧ диапазона ввиду емкости корпуса, шунтирующей $p-i-n$ -структуру. В то же время в рассматриваемом диапазоне размеры диодных корпусов становятся соизмеримыми с длиной волны, и появляется возможность улучшения характеристик за счет трансформации входного импеданса к клеммам диодной структуры через диэлектрическую стенку корпуса. В этом случае диодный корпус целесообразно рассматривать в виде радиальной линии с помещенной в центре полупроводниковой структурой [4].

При заданных параметрах диодной структуры и индуктивности ее монтажа выбором размеров радиальной линии достигается широкополосное согласование диода с волноводной линией передачи ($\Delta f/f \approx 30\%$) в режиме пропускания. В диапазоне частот 120...180 ГГц модуляторы инверсного типа обеспечивают потери пропускания 1,0...1,5 дБ и потери в режиме запирающего 25...30 дБ при значенных параметрах кремниевых $p-i-n$ -диодов, указанных в таблице.

На рис. 1 представлена конструкция выключателя с продольно-распределенной слоистой $p-i-n$ -структурой, предназначенная для работы в диапазоне частот 200...400 ГГц.

Экспериментальные частотные характеристики такого выключателя, приведенные на рис. 2, указывают на возможность создания широкополосных устройств для управления уровнем СВЧ мощности в субмиллиметровом диапазоне длин волн. Однако при этом необходимо учитывать возрастание потерь в продольно-распределенных $p-i-n$ -структурах с увеличением рабочей частоты.

В обесточенном состоянии диода потери пропускания в устройстве зависят, в основном, от постоянной затухания в полупроводниковой структуре, значение которой определяется поглощением СВЧ энергии свободными носителями a_0 , диэлектрическими потерями в полупроводнике при отсутствии носителей a_e и контактными потерями a_k .

Суммы $a_0 + a_\epsilon$ для высокоомного кремния с проводимостью около $10^4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ составляют 0,3...0,4 дБ/см в сантиметровом и миллиметровом диапазонах. Основной вклад в значение постоянной затухания вносят контактные потери a_k , которые увеличиваются с уменьшением длины волны. Для $p-i-n$ -структур с толщиной i -области 0,4 мм и толщиной легированных слоев 0,7...1,0 мкм с проводимостью $5 \cdot 10^2 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ контактные потери составляют 1 дБ/см на длине волны 8 мм и 14 дБ/см на длине волны 1 мм. В субмиллиметровом диапазоне для уменьшения a_k необходимо уменьшать толщину легированных слоев и увеличивать их проводимости до $10^4 \dots 10^5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$.

Продольно-распределенные $p-i-n$ -структуры с малой толщиной легированных слоев и большим значением проводимости имеют относительно малое значение постоянной затухания в миллиметровом диапазоне. Уменьшить постоянную затухания можно также при частичном заполнении волноводного тракта. Широкополосная компенсация отражений на входе и выходе устройства с полупроводниковой структурой, расположенной в волноводном тракте, может быть достигнута с помощью диэлектрических вставок или трансформаторов волноводного типа.

Рассмотрим полупроводниковую $p-i-n$ -структуру поперечно-распределенного типа, представленную на рис. 3.

Эта структура представляет собой тонкую пластину высокоомного кремния, установленную поперек волновода (лучевода). По сторонам пластины ортогонально электрическому полю электромагнитной волны сформированы линейные переходы, образующие контакты, которые инжектируют дырки с одной стороны и электроны с другой стороны в

Параметры кремниевых $p-i-n$ -диодов для модуляторов инверсного типа
Parameters of the silicon $p-i-n$ -diodes for the modulators of the inverse type

Наименование параметра и единица измерения Parameters and units of measurement	Обозначение Designation	Значение параметра Values of the parameters
Емкость диодной структуры, пФ Capacity of the diode structure, pF	C_i	0,04...0,08
Сопротивление потерь, Ом Resistance of losses, Ω	R_s	1...2
Дифференциальное сопротивление, Ом Differential resistance, Ω	R_d	3
Индуктивность монтажа структуры, нГн Inductance of the assemblage structure, nH	L_s	0,2...0,25
Внешний диаметр корпуса, мм External diameter of the package, mm	D	0,4
Внутренний диаметр корпуса, мм Internal diameter of the package, mm	d	0,2
Высота корпуса, мм Height of the package, mm	h	0,15

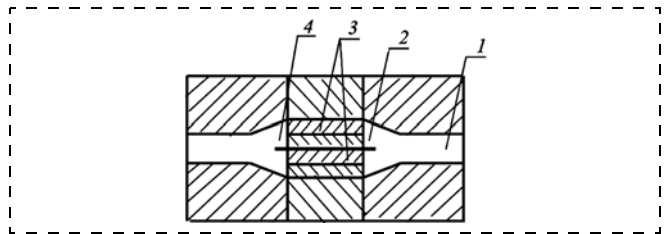


Рис. 1. Конструкция выключателя с продольно-распределенной слоистой $p-i-n$ -структурой: 1 — волновод сечением $0,35 \times 0,7$ мм; 2 — переход с сечения $0,35 \times 0,7$ на $0,8 \times 0,7$ мм; 3 — $p-i-n$ -структура (толщина i -области 150 мкм); 4 — тонкая металлическая перегородка

Fig. 1. A switch design with the longitudinally distributed layer $p-i-n$ -structure: 1 — waveguide with section of 0.35×0.7 mm; 2 — transition from section 0.35×0.7 to section 0.8×0.7 mm; 3 — $p-i-n$ -structure (thickness of the i -area is 150 μm); 4 — thin metal partition

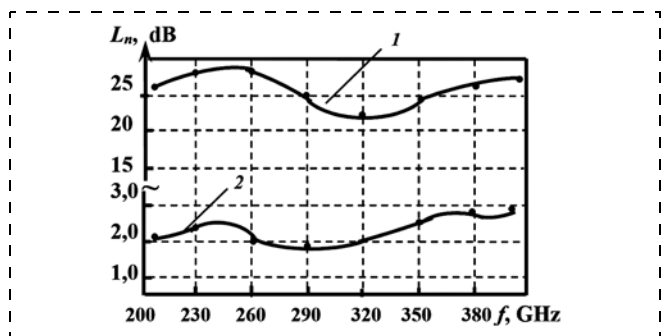


Рис. 2. Частотные характеристики потерь запирающей (1) и пропускающей (2) выключателя с продольно-распределенной $p-i-n$ -структурой

Fig. 2. Frequency characteristics of the losses of locking (1) and transmission (2) of the switch with the longitudinally distributed $p-i-n$ -structure

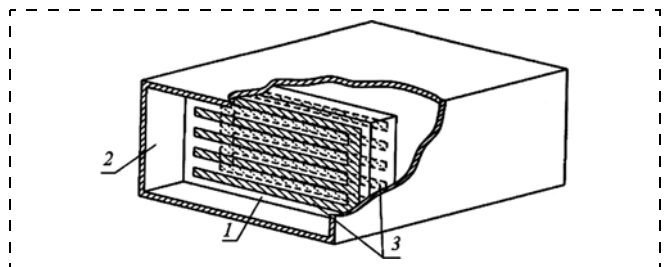


Рис. 3. Конструкция выключателя с поперечно-распределенной слоистой $p-i-n$ -структурой: 1 — кремниевая пластина; 2 — волновод; 3 — инжектируемая структура

Fig. 3. Design of a switch with the cross distributed layer $p-i-n$ -structure: 1 — silicon plate; 2 — waveguide; 3 — injected structure

объем пластины. Изменение проводимости полупроводникового материала осуществляется подачей прямого смещения на инжектирующие контакты [2].

Необходимо заметить, что электронно-дырочная плазма в объеме полупроводника обеспечивает требуемое значение развязки (более 20 дБ) лишь в том случае, если она равномерно распределена в объеме полупроводниковой структуры, помещенной в волновод. Этого можно достичь, когда расстояние между металлическими полосками контактной структуры примерно равно удвоенной длине амбиполярной диффузии, а падение напряжения вдоль контактных полосок невелико.

Также следует обратить внимание на то, что изменение относительного положения контактных полосок на противоположных сторонах кремниевой пластины не увеличивает вносимые потери при условии $\pi t/d > 2,2$, где t — толщина кремниевой пластины, d — расстояние между центрами металлических полосок. Если значение этого отношения выбрано правильно, можно использовать металлические контакты, покрывающие большую часть поверхности кремниевой пластины. Это позволяет получить более однородную по объему плазму и увеличить проводимость $p-i-n$ -структуры в режиме отражения СВЧ мощности.

Устройства с применением поперечно-распределенных полупроводниковых $p-i-n$ -структур требуют достаточно больших токов управления (единицы ампер) и обеспечивают быстроедействие на уровне единиц микросекунд. Лучших результатов можно достигнуть при использовании поверхностно-ориентированных $p-i-n$ -структур, сформированных определенным образом на одной из поверхностей полупроводниковой пластины, имеющей высокое удельное сопротивление ($\rho \geq 10\,000 \text{ Ом} \cdot \text{см}$). В такой конструкции увеличение проводимости происходит не по всему объему кремниевой пластины, помещенной в волновод, а в областях, параллельных вектору электрического поля с ориентацией H_{01} .

При разработке электрически управляемой кремниевой пластины, помещенной в волновод,

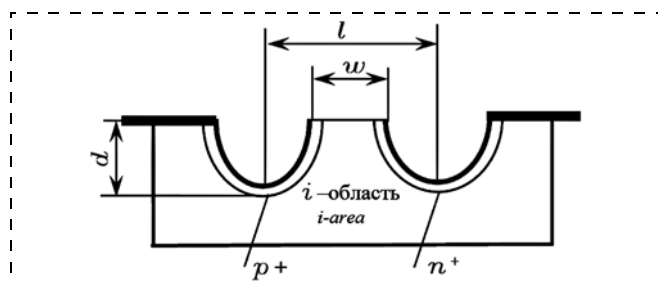


Рис. 4. Конструкция поверхностно-ориентированного диода
Fig. 4. Design of the surface-oriented diode

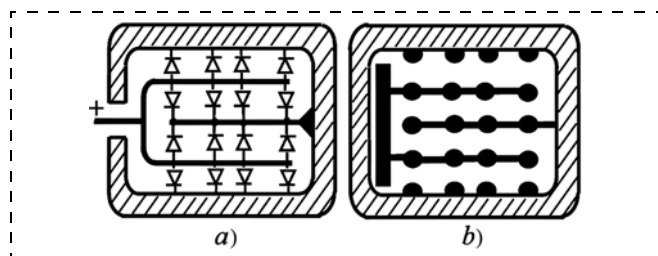


Рис. 5. Конструкция выключателя волноводного типа, содержащего поверхностно-ориентированные $p-i-n$ -структуры: а — схема соединения поверхностно-ориентированных $p-i-n$ -структур; б — внешний вид поверхности кремниевой структуры, установленной в волноводе

Fig. 5. Design of the switch of the waveguide type containing surface-oriented $p-i-n$ -structures: а — circuit of connection of the surface-oriented $p-i-n$ -structures; б — view of the surface of the silicon structure fixed in the waveguide

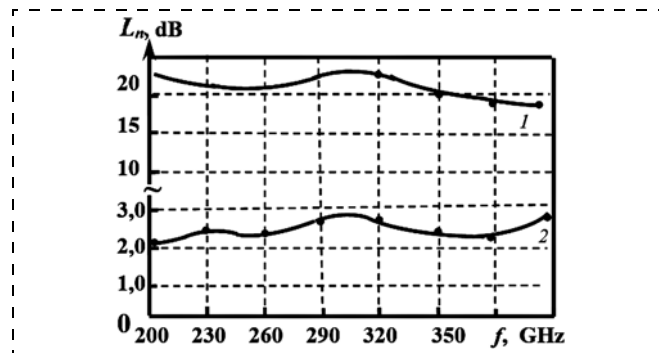


Рис. 6. Частотные зависимости потерь пропускания (1) и потерь запираания (2) решетки поверхностно-ориентированных $p-i-n$ -структур

Fig. 6. Frequency dependences of the transmission losses (1) and locking losses (2) of the lattice of the surface-oriented $p-i-n$ -structures

учитывали электрофизические параметры известных поверхностно-ориентированных диодов. В процессе ее изготовления были использованы стандартные технологические приемы. Сначала в кремнии вытравливали каналы смещения, которые имели "карманы" — участки глубиной 20...30 мкм в области легирования примесями n^+ - и p^+ -типа (рис. 4).

Расстояние между карманами l выбирали из условия $l < \lambda/(2\sqrt{\epsilon})$, ширина i -области $w \approx 30 \text{ мкм}$. При соотношении размеров $w/d \approx 1$ и глубине карманов $d = 15 \text{ мкм}$ сопротивление полупроводникового диода составляло 2,5...3,0 Ом при токе 50 мА.

Полупроводниковая кремниевая пластина размерами $0,35 \times 0,7 \text{ мм}$ содержит девять каналов смещения, ортогональных электрическому полю электромагнитной волны, распространяющейся по волноводу сечением $0,35 \times 0,7 \text{ мм}$. Общая толщина пластины равна примерно 150 мкм, что составляет половину длины волны в кремнии на частоте 300 ГГц.

На рис. 5 представлены образцы кремниевой пластины, содержащей поверхностно-ориентированные $p-i-n$ -структуры; а на рис. 6 — частотные характеристики ее потерь пропускания и запираания. Потери запираания более 20 дБ достигаются при токе управления 0,5 А. Быстродействие составляет около 500 нс. Расширения рабочей полосы частот можно добиться установкой диэлектрических вставок с обеих сторон кремниевого окна.

Практические применения терагерцового диапазона

Эта тема очень подробно освещена в различных обзорах, опубликованных в последние 20 лет (см., например, [5—7] и цитируемую в этих работах литературу). Поэтому здесь кратко перечислим только те возможные применения терагерцовых волн и устройств, работающих на терагерцовых частотах, которые считаем наиболее интересными.

Во-первых, — это системы связи. Кроме высокой информационной емкости сигналов, позволяющей передавать большие потоки информации в

единицу времени, системы терагерцового диапазона имеют ряд дополнительных преимуществ: высокую защиту от помех и конфиденциальность передаваемой информации. Вследствие малой длины волны возможно применение антенн с узкой диаграммой направленности, что позволяет создать пространственное разнесение радиолиний и обеспечить отсутствие взаимных интерференционных помех.

Во-вторых, в последние годы активно ведутся работы по созданию современной радиолокационной аппаратуры, систем высокоточного тактического оружия, систем управления беспилотными летательными аппаратами, сенсорных систем и компактных РЛС ближнего радиуса действия широкого назначения [8–10]. Применение указанных систем в коротковолновой части миллиметрового диапазона позволяет сочетать характерные для техники СВЧ высокую разрешающую способность по частоте и быструю перестройку частоты с высоким пространственным разрешением, достигаемым с помощью свойственных этому диапазону длин волн апертур, типичных для оптической техники.

Активно ведутся работы по созданию головок самонаведения и датчиков с автономным наведением на наземные объекты (цели) и соответствующих радиочастотных компонентов для их реализации в коротковолновой части миллиметрового диапазона [11]. Головки самонаведения и датчики терагерцового диапазона (94, 140 и 240 ГГц) имеют важные преимущества перед соответствующими устройствами оптического и длинноволнового СВЧ диапазонов. На этом участке спектра обеспечивается наилучшая видимость поля боя при наличии дыма, пыли, тумана и редкого лиственного покрова. Кроме того, по сравнению с радиолокационными устройствами СВЧ диапазона головки самонаведения и датчики терагерцового диапазона имеют более высокое пространственное разрешение, повышенную точность сопровождения вследствие меньшего воздействия эффектов многолучевого распространения и помех от наземных объектов, меньшую уязвимость к воздействию средств радиоэлектронного подавления вследствие низкой вероятности перехвата сигналов и высокой помехоустойчивости.

В-третьих, — это радиовидение. В работе [12] дан краткий обзор известных систем радиовидения и обоснована перспективность их построения на принципах мультистатической радиоголографии (МРГ) с применением неподвижных антенных решеток. Проанализированы характеристики этих систем, и отмечены технологические преимущества метода МРГ, обусловленные возможностью применения разреженных антенных решеток с неуправляемыми по фазам антенными элементами. Приведены характерные для метода МРГ размеры и шаг двумерных разреженных антенных

решеток и результаты фокусировки радиоизображений в двухчастотных диапазонах — сантиметровом (15 ГГц) и субмиллиметровом (350 ГГц) для многоточечного объекта, расположенного на различных расстояниях от антенных решеток.

Наиболее высокочастотной из известных активных систем радиовидения является субмиллиметровая система, работающая в диапазоне 350 ГГц на расстоянии 10 м [13]. В ней использован квазиоптический радиообъектив на основе эллиптического зеркала. Коническое сканирование луча осуществляется за счет механического вращения плоского зеркала.

В-четвертых, — это томография и системы безопасности. Достаточно широкий и информативный спектральный диапазон для исследования свойств большого количества различных объектов (твердые тела, жидкости, биологические объекты) является основным преимуществом терагерцового диапазона [14–17]. В отличие от рентгеновского, терагерцовое излучение не обладает ионизирующими свойствами. С его помощью можно создавать объемное изображение структур, например мягких тканей, чего нельзя сделать в рентгеновском диапазоне. Технику терагерцового излучения можно с успехом использовать в тех случаях, где необходим непрерывный мониторинг живых объектов, например, при томографических исследованиях, в биологии и в постоянно работающих системах безопасности объектов.

И наконец, в-пятых, — это вычислительная техника и искусственный интеллект. Первые электронно-вычислительные машины имели тактовые частоты порядка сотен килогерц, современные — в десятки тысяч раз больше — единицы гигагерц. И скорость обработки информации в вычислительных системах неуклонно возрастает. При этом уменьшаются их размеры, масса и энергопотребление. Эти тенденции обеспечивают прогресс не только персональных гаджетов, но и бортовых пилотируемых и беспилотных систем вооружения.

В этой работе элементная база будущей вычислительной техники, способной обеспечить терагерцовые тактовые частоты процессоров, не рассматривалась. Но работы в этом направлении в мире активно ведутся [18–24]. В США их поддерживают DARPA и корпорация Intel. Созданы экспериментальные образцы ряда элементов сверхбыстродействующей наноэлектроники с низким энергопотреблением [22] на основе антимонида индия (InSb): транзистор с квантовой ямой [22] и полевой транзистор на нанопроводе [23, 24]. Уже эти первые образцы способны функционировать на частотах 300 ГГц и более. Теоретические же оценки показывают [19, 20], что предельные частоты для квантовых приборов на основе нанопроводов могут достигать десятков терагерц.

В работах [25—27] функционирование мозга человека рассмотрено с позиций электроники. Число активных элементов в мозге N_b оценивается автором этих работ по числу каналов и составляет примерно 10^{21} . Если принять в качестве характерного линейного размера активного элемента микросхемы будущего значение 10 нм, то число активных элементов в микросхеме N_m составит ориентировочно 10^{12} . Разница в миллиард раз не сулит, на первый взгляд, перспектив скорого создания искусственного интеллекта, сравнимого с человеческим мозгом. Однако следует принять во внимание, что скорость обработки сигнала каждым элементом мозга f_b невелика и составляет всего около 200 Гц. Высокое быстродействие достигается за счет параллелизма обработки и большого количества активных элементов. Функциональное быстродействие мозга F_B без учета параллельной обработки информации, определяемое как произведение числа элементов на скорость обработки сигнала каждым элементом, составит

$$F_B = N_b f_b \approx 10^{23} \text{ Гц.}$$

Для перспективной микросхемы аналогичная величина F_m может быть оценена как

$$F_m = N_m f_m \approx 10^{21} \text{ Гц,}$$

где в качестве f_m принята тактовая частота современных процессоров порядка единиц гигагерц.

Как видим, разница в функциональном быстродействии составляет всего два порядка. Создание процессоров с тактовыми частотами, превышающими 100 ГГц, вместе с уменьшением активных элементов микросхем до нанометровых размеров позволит говорить об искусственном интеллекте уже всерьез. Параллельно должна быть решена задача кардинального снижения удельной потребляемой мощности. Реализацию этих возможностей сулит сверхбыстродействующая нанoeлектроника с низким энергопотреблением [21].

Заключение

Эта работа посвящена основным особенностям конструктивных решений полупроводниковых электронных компонентов для устройств и систем терагерцового диапазона — перспективного направления высокочастотной техники и технологии.

Очевидные притягательные свойства терагерцового излучения, такие как большая информационная емкость сигналов, отсутствие ионизирующего воздействия, способность проникать через непрозрачные объекты и т. п. обусловили активное развитие техники этого диапазона в мире.

Особо следует выделить возможности и перспективы создания на основе терагерцовой техники высокоточных систем вооружений. По сравнению с СВЧ диапазоном в этом диапазоне достигается

существенно более высокое угловое разрешение систем наведения при малых размерах антенн. На частотах терагерцового диапазона тактические цели имеют большие площади рассеяния. В настоящее время отмечается достаточно активное практическое освоение нижнего края терагерцового диапазона в целях создания малогабаритных, высокоточных и высокоэффективных радиолокационных систем обнаружения и сопровождения, головок самонаведения для систем тактического оружия, высокоскоростных радиолиний связи, способных обмениваться большими объемами информации. Такие системы работают в окнах прозрачности атмосферы в частотных диапазонах 94, 145 и 220 ГГц.

Также важно подчеркнуть неизбежность постепенного перехода вычислительных систем в терагерцовый диапазон тактовых частот процессоров. Такие системы, очевидно, качественно изменят как гражданскую, так, и прежде всего, военную технику. Разработкой перспективной элементной базы для сверхбыстродействующих логических схем активно занимаются в США и Китае.

Если же говорить о будущем терагерцовой техники, то мы полагаем, что эта специфическая область объединит многие ценные качества СВЧ и оптического диапазонов, и найдет много новых и практических важных применений в различных областях науки и техники.

Список литературы

1. Карушкин Н. Ф., Мальшко В. В., Ореховский В. А., Тухаринов А. А. Коммутационные управляемые устройства на $p-i-n$ -диодах миллиметрового диапазона длин волн // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2016. № 4—5. С. 34—40.
2. Карушкин Н. Ф. Устройства для переключения и модуляции СВЧ мощности в миллиметровом диапазоне // Радиофизика и электроника. Харьков. 2004. Т. 9, № 3. С. 526.
3. Карушкин Н. Ф., Обухов И. А., Смирнова Е. А. Патент РФ на изобретение № 2657324. Применение промышленного часового камня в качестве корпуса полупроводникового устройства миллиметрового диапазона длин волн и генератор колебаний с таким устройством.
4. Карушкин Н. Ф. Характеристики быстродействующих амплитудных переключателей инверсного типа миллиметрового диапазона // Техника и приборы СВЧ. 2010. № 1. С. 11—15.
5. Майская В. Освоение терагерцовой щели. Полупроводниковые приборы вторгаются в субмиллиметровый диапазон // Электроника: НТБ. 2011. № 8. С. 74—87.
6. Еру И. И. Терагерцовая техника и технология: современное состояние, тенденции развития и перспективы практического применения // Успехи современной радиоэлектроники. 1997. № 3. С. 51—79.
7. Братман В. Л., Литвак А. Г., Суворов Е. В. Освоение терагерцового диапазона: источники и приложения // УФН. 2011. Т. 181, № 8. С. 867—874.
8. Нефедов С. И., Нониашвили М. И., Лаговьер А. А., Голубов М. Е. Перспективы применения миллиметровой радиолокации для обнаружения и распознавания неподвижных и движущихся объектов на фоне подстилающей поверхности // Материалы IV Всероссийской конференции "Радиоэлектроника и радиосвязь", ИРЭ РАН, г. Москва, 2010. С. 237—242.

9. **Зубков А. Н., Обуханич Р. В., Карушкин Н. Ф., Прудис И. Н., Слеркло Л. М.** Перспективы создания радиолокационных систем селекции и распознавания сложных целей в миллиметровом диапазоне // Прикладная радиоэлектроника. Т. 1. Харьков. 2002. № 1. С. 77–81.

10. **Веремеенко К. К., Желтов С. Ю., Ким Н. В., Себряков Г. Г., Красилович М. Н.** Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов. М.: Физматлит, 2009. 556 с.

11. **Анашкин И. М.** Разработка авиационного оружия малого калибра с многорежимными головками самонаведения за рубежом // Вестник военной академии. Республика Беларусь. 2012. № 2. С. 4–23.

12. **Калошин В. А., Чапурский В. В.** Анализ систем радиовидения на основе дискретной мультистатической радиолокации // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2012. С. 236–250.

13. **Sheen D. M.** et. al. Standoff concealed weapon detection using a 350 GHz radar imaging system // Proc. SPIE-2010. vol. 7670. P. 767008-1–767008-10.

14. **Казаринов Е. Д.** Биологические эффекты электромагнитного поля терагерцового диапазона // Электронная техника. Серия 1. СВЧ техника. 2009. Вып. 4 (508). С. 48–58.

15. **Бецкий О. В., Кислов В. В., Козьмин А. С.** и др. Терагерцовые волны и их применение // Материалы 17-й Международной Крымской конференции. СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. Севастополь. 2007. С. 771–773.

16. **Chusseau L., Lampin J.-F., Bollaert S.** et al. THz active devices and applications: a survey of recent research // Proc. of 35th European Microwave Conference. 2005. P. 1–4.

17. **Бецкий О. В., Киричук В. Ф., Креницкий А. П., Лебедева Н. Н., Майбородин А. В., Тушкин В. Д., Шуб Г. М.** Терагерцовые волны и их применение. Биомедицинские технологии // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2005. № 8. С. 40–48.

18. **Обухов И. А.** Некоторые проблемы современной наноэлектроники // Материалы 15-й Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". 2005. С. 5–7.

19. **Obukhov I.** Some aspects of nanoelectronics development in Russia // WTEC Workshop Proceedings: Russian Research and Development Activities on Nanoparticles and Nanostructured Materials, S. Petersburg, 1997. P. 116–125.

20. **Obukhov I. A.** Planar One-Dimensional Quantum Devices // Nanoscience and Nanotechnology. 2013. N. 3 (5). P. 115–122.

21. **Datta S.** The 21st Century Energy Efficient Logic Transistor, Formerly with Advanced Transistor & Nanotechnology Group Intel Corporation Hillsboro, Oregon, USA, October 9th, 2007. URL: <http://www.sematech.org/meetings/archives/litho/8065/pres/Key%20Note%20Suman%20Datta.pdf>

22. **Ashley T., Barnes A. R., Buckle L., Datta S.** et al. InSb-based Quantum Well Transistor for High Speed, Low Power Applications, URL: <http://csmantech.pairserver.com/Digests/2005/2005papers/14.18.pdf>

23. **Das S. R., Delker C. J., Zakharov D., Yong P. Chen, Sands T. D., Janes D. B.** Room Temperature Device Performance of Electrodeposited InSb Nanowire Field Effect Transistors // Appl. Phys. Lett. 2011. Vol. 98, 243504.

24. **Zai-xing Yang, Ning Han, Fengyun Wang** et al. Carbon doping of InSb nanowires for high-performance p-channel field-effect-transistors // Nanoscale. 2013. N. 5. P. 9671–9676.

25. **Абрамов И. И.** Перспективы использования наноэлектроники, наноматериалов и нанотехнологий в исследовании и медицине мозга человека // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18, № 1. С. 49–64.

26. **Абрамов И. И.** Сознание человека, или возможности электроники. Часть I // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20, № 5. С. 308–320.

27. **Абрамов И. И.** Сознание человека, или возможности электроники. Часть II // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20, № 6. С. 368–384.

N. F. Karushkin, Ph. D., Head of Department, State Enterprise "Research Institute "Orion", Kiev, 03680, Ukraine,

I. A. Obukhov, D. Sc. of Physico-Mathematical Sciences, Senior Research Officer, LLC Research and Production Organization "Sinergetika", Moscow, 115419, Russian Federation, e-mail: iao001@mail.ru,

E. A. Smirnova, Postgraduate, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation, e-mail: elizaveta.a.smirnova@yandex.ru

Corresponding author:

Smirnova Elizaveta A., Postgraduate, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation, e-mail: elizaveta.a.smirnova@yandex.ru

Semiconductor Components and Electronic Technology Devices in the Short Wave Section of the Microwave Radiation. Part III

Received on October 5, 2018

Accepted on October 29, 2018

The authors analyze the level of development of the element base for the electronic equipment of the semiconductor and waveguide electrodynamic structures in the shortwave part of the microwave range. One of the main problems arising in the implementation of the terahertz range is associated with the need to provide advanced equipment developed for this frequency band with effective electronic components. This paper contains a comparative analysis of characteristics of the terahertz range components, based on the solid-state elements and the waveguide electrodynamic structures. It presents the features of the design solutions in the process of development of the semiconductor components and devices, such as oscillators, amplifiers, frequency multipliers, power meters, transmission lines, and devices for modulation of the electromagnetic waves using $p-i-n$ -structures. The authors consider the main directions for practical applications of the hardware in the terahertz range and advantages of the terahertz range for development of the high-speed communication systems, high-resolution radars, radio-vision systems, remote identification devices of substances, and other kinds of special and civil engineering.

Keywords: terahertz range, generators, detectors, amplifiers, $p-i-n$ -modulators, transmission lines, radio-vision, frequency multipliers, microwave modules, radar, artificial intelligence

For citation:

Karushkin N. F., Obukhov I. A., Smirnova E. A. Semiconductor Components and Electronic Technology Devices in the Short Wave Section of the Microwave Radiation. Part III, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 5, pp. 288–297.

DOI: 10.17587/nmst.21.288-297

Control devices — modulators

For control of the power level and modulation of the microwave signals, the $p-i-n$ -diodes with the lumped and distributed parameters are used. The known high-speed amplitude modulators capable to change the power levels in units of nanoseconds are made with the use of the $p-i-n$ -diodes with the lumped parameters and thickness of the i -area of 3...10 μm [1, 2].

The modulators of the inverse type also ensure the switching time of units of nanoseconds. As the switching elements, they use $p-i-n$ -structures made by mesa technology and fixed into the ruby watch stones, metallized on the end faces [3].

The packaging of the diodes improves the operational characteristics of the electronic components but limits their application in the short-wave part of the microwave range because of the capacity of the package, shunting the $p-i-n$ -structure. At the same time in the considered range, the sizes of the diode packages become commensurable with the wavelength, and a possibility appears for improvement of the characteristics due to the transformation of the input impedance to the plugs of the diode structure through the dielectric wall of the package. In this case, it is expedient to consider the diode case in the form of the radial line with the semiconductor structure placed in the center [4].

At the set parameters of the diode structure and inductance of its installation, by selection of the size of the radial line, the broadband coordination is achieved of the diode with the waveguide transmission line ($\Delta f/f \approx 30\%$) in the transmission mode. In the range of frequencies of 120...180 GHz the modulators of the inverse type ensure transmission losses of 1.0...1.5 dB and losses in the locking mode of 25...30 dB at the values of the parameters of the silicon $p-i-n$ -diodes specified in the Table.

Fig. 1 presents a switch design with the longitudinally distributed layer $p-i-n$ -structure intended for operation within the range of frequencies of 200...400 GHz.

The experimental frequency characteristics of such a switch presented in fig. 2 point to a possibility of development of the broadband devices for control of the microwave power level in the submillimeter range of the wavelengths. However, at the same time, it is necessary to consider an increase of losses in the longitudinally distributed $p-i-n$ -structures with an increase of the working frequency.

In a deenergized state of the diode the transmission losses in a device depend, mainly, on the attenuation

constant in a semiconductor structure, the value of which is determined by absorption of the microwave energy by the free a_0 carriers, the dielectric losses in the semiconductor in absence of a_e carriers and a_k contact losses. The sums of $a_0 + a_e$ for the high-resistance silicon with the conductivity of about $10^4 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ equal to 0.3...0.4 dB/cm in the centimeter and millimeter ranges. The main contribution to the value of the attenuation constant is made by the contact losses of a_k , which increase with the reduction of the wavelength. For the $p-i-n$ -structures with the thickness of the i -area of 0.4 mm and thickness of the alloyed layers of 0.7...1.0 μm and conductivity of $5 \cdot 10^2 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ the contact losses make 1 dB/cm on the wavelength of 8 mm and 14 dB/cm on the wavelength of 1 mm. In the submillimeter range for reduction of a_k , it is necessary to reduce the thickness of the alloyed layers and increase their conductivity up to $10^4... 10^5 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$.

The longitudinally distributed $p-i-n$ -structures with a small thickness of the alloyed layers and a great value of the conductivity have a relatively small value of the attenuation constant in the millimeter range. It is also possible to reduce the attenuation constant due to a partial filling of the waveguide path. A broadband compensation for the reflections at the input and output of the device with the semiconductor structure located in the waveguide path can be reached by means of the dielectric inserts or by means of the transformers of the waveguide type.

Let us consider a semiconductor $p-i-n$ -structure of the cross distributed type presented in fig. 3.

This structure is a thin plate of high-resistance silicon fixed across the waveguide. On the sides of the plate, orthogonally to the electric field of the electromagnetic wave, the linear transitions with contacts are formed, which inject holes on one side and electrons on the other side into the plate volume. Variation of the conductivity of the semiconductor material is carried out by a direct shift to the injecting contacts [2].

It is necessary to point out that the electron-hole plasma in the volume of the semiconductor ensures the required value of decoupling (more than 20 dB) only in case if it is distributed evenly in the volume of the semiconductor structure placed into the wave guide. This can be reached, when the distance between the metal strips of the contact structure is equal to an approximately doubled length of the ambipolar diffusion, while the voltage drop along the contact strips is small.

It is also necessary to pay attention to the fact that a change of the relative position of the contact strips on

the opposite sides of the silicon plate does not increase the brought losses at the condition that $\pi t/d > 2.2$, where t — thickness of the silicon plate, d — distance between the centers of the metal strips. If the value of this correlation is selected correctly, it is possible to use the metal contacts covering the most part of the surface of the silicon plate. This allows us to receive plasma, more uniform in its volume, and to increase the conductivity of the $p-i-n$ -structure in the mode of reflection of the microwave power.

The devices with the application of the cross distributed semiconductor $p-i-n$ -structures demand rather big control current (a unit of amperes) and ensure the speed at the level of units of microseconds. The best results can be achieved due to the use of the surface-oriented $p-i-n$ -structures formed in a certain way on one of the surfaces of the semiconductor plate with high specific resistance ($\rho \geq 10\,000 \Omega \cdot \text{cm}$). In such a design an increase of the conductivity happens not in all of the volume of the silicon plate placed in the waveguide, but in the areas, parallel to the vector of the electric field with H_{01} orientation.

During development of an electrically-controlled silicon plate placed in the waveguide, the electrophysical parameters of the known surface-oriented diodes were considered. In the course of its manufacture, the standard processing methods were used. At first in silicon shift channels were etched, which had "pockets" — the sites with the depth of 20...30 μm in the area of alloying by impurities of n^+ - and p^+ -types (fig. 4).

The distance between the pockets of l was chosen from the condition $l < \lambda/(2\sqrt{\epsilon})$. The width of the i -area was $w \approx 30 \mu\text{m}$. At the correlation of the sizes of $w/d \approx 1$ and the depth of the pockets of $d = 15 \mu\text{m}$ the resistance of the semiconductor diode was 2.5...3.0 Ω at the current of 50 mA.

The semiconductor silicon plate with the size of $0.35 \times 0.7 \text{ mm}$ contains nine shift channels, orthogonal to the electric field of the electromagnetic wave propagating via the waveguide with the section of $0.35 \times 0.7 \text{ mm}$. The total thickness of the plate is equal to about 150 μm , which is half of the wavelength in the silicon at the frequency of 300 GHz.

Fig. 5 presents samples of the silicon plate containing the surface-oriented $p-i-n$ -structures, and fig. 6 presents the frequency characteristics of its transmission and locking losses. The locking losses over 20 dB are reached at the control current of 0.5 A. The operation speed is about 500 ns. An expansion of the working strip of frequencies can be achieved by installation of dielectric inserts on both sides of the silicon window.

Practical use of the terahertz range

This topic was presented in detail in various reviews published in recent 20 years (see, for example, [5—7]

and the literature quoted in those works). Therefore, here we will enumerate only briefly those possible applications of the terahertz waves and the devices working in the terahertz frequencies, which we consider the most interesting.

First of all, these are communication systems. Besides the high information capacity of the signals allowing us to transfer big flows of information in a unit of time, the systems of the terahertz range have a number of additional advantages: high protection against interferences and confidentiality of the transmitted data. Due to a small wavelength, it is possible to use antennas with a narrow directional pattern, which makes possible to create a spatial spread of the radio lines and ensure the absence of mutual interferences.

Secondly, in recent years active works have been going on for development of modern radar equipment, systems of precision tactical weapons, drone control systems, sensor systems and compact short-range multipurpose radars [8—10]. Application of the specified systems in the short-wave part of the millimeter range allows us to combine the high resolution frequency characteristic of the microwave equipment and quick retuning of the frequency with a high spatial resolution achieved due to the wavelengths of the apertures within the range typical for this optical equipment.

Active works are going on for development of the self-homing heads and sensors for the ground objects (targets) and of the corresponding radio-frequency components for their realization in the short-wave part of the millimeter range [11]. The self-homing heads and sensors of the terahertz range (94, 140 and 240 GHz) have important advantages compared with the corresponding devices of the optical and long-wave microwave ranges. In presence of smoke, dust, fog and a rare deciduous forest the best visibility of a battlefield is ensured in this section of the range. Besides, in comparison with the radar devices of the microwave range, the self-homing heads and sensors of the terahertz range have higher spatial resolution, increased accuracy owing to the smaller influence of the effects of a multi-beam propagation and hindrances from the ground objects, and smaller vulnerability to the influence of the radio-electronic suppression because of a lower probability of interception of signals and high noise stability.

Thirdly, this is radio-vision. In [12] a brief review is presented of the known radio-vision systems and the prospects for their construction on the principles of the multi-static radio-holography (MSRH) with the application of the stationary antenna arrays. The characteristics of those systems are analyzed, as well as the technological advantages of the MSRH method explained by a possibility of application of the rarefied antenna arrays with the antenna elements not controlled by phases. The sizes, characteristic of the MSRH method, and the step of the two-dimensional rarefied antenna arrays

and the results of focusing of the radio-images in two-frequency ranges — centimeter (15 GHz) and submillimeter (350 GHz) for a multipoint object located at various distances from the antenna arrays, are also presented.

Out of the known active radio-vision systems the most high-frequency one is the submillimeter system operating in the range of 350 GHz at the distance of 10 m [13]. It employs the quasioptical radio-lens on the basis of an elliptic mirror. The conic scanning of a beam is carried out due to the mechanical rotation of a flat mirror.

Fourthly, it is the tomography and the security systems. A rather wide and informative spectral range for research of the properties of a big number of various objects (solid bodies, liquids, biological objects) is the main advantage of the terahertz range [14–17]. Unlike the x-ray, the terahertz radiation has no ionizing properties. By means of it, it is possible to create a volume image of the structures, for example, soft tissues, which cannot be done in the x-ray range. The terahertz radiation technology can be used successfully in cases, when continuous monitoring of the live objects is necessary, for example, in the tomography research works, in biology and in constantly working security systems of objects.

And, at last, fifthly, it is the computer technologies and artificial intelligence. The first electronic and computing machines had the clock frequency of about hundreds of kilohertz, while the modern ones — units of gigahertz, that is, tens of thousands times more. And the speed of information processing in the computing systems increases steadily. At the same time, their sizes, weight and energy consumption decrease. These trends ensure progress of not only personal gadgets but also of the onboard piloted and pilotless arms systems.

In this work, the element base of the future computer hardware, capable to ensure the terahertz clock frequencies for the processors, was not considered. But in the world the works in this direction are being conducted actively [18–24]. In the USA they are supported by DARPA and Intel Corporation. Experimental samples of a number of elements of the ultrafast nanoelectronics with low energy consumption [22] on the basis of the indium antimonide (InSb) have been created: a transistor with a quantum well [22] and a field transistor on a nanowire [23, 24]. Already these first samples can function at frequencies of 300 GHz and over. Theoretical estimates show [19, 20] that the extreme frequencies for the quantum devices on the basis of the nanowires can reach tens of terahertz.

In [25–27] functioning of a human brain is considered from the positions of electronics. The author of these works estimates the number of the active elements in a brain of N_b by the number of the channels and it equals to about 10^{21} . If we accept the value of 10 nm

as the characteristic linear size of an active element of a microcircuit of the future, then the number of the active elements in N_m microcircuit will approximately be equal to 10^{21} . At first sight, the one billion times difference does not promise prospects for quick development of artificial intelligence comparable with a human brain. However, it is necessary to take into account that the speed of processing of a signal by each element of the brain of f_b is small and is only about 200 Hz. A higher speed is reached due to a parallel processing and a big number of the active elements. The functional speed of the brain of F_B without a parallel information processing, determined as the product of the number of the elements and the speed of processing of a signal by each element, will be

$$F_B = N_b f_b \approx 10^{23} \text{ Hz.}$$

For a promising microcircuit a similar value of F_m can be estimated as

$$F_m = N_m f_m \approx 10^{21} \text{ Hz,}$$

where f_m is the assumed clock frequency of the modern processors of about units of gigahertz.

As we see, the functional speed differs only by two orders. Development of the processors with the clock frequencies exceeding 100 GHz alongside with reduction of the sizes of the active elements of the microcircuits down to the nanometer dimensions will allow us to speak about the artificial intelligence already seriously. The problem of a cardinal decrease of the specific power consumption has to be solved in parallel. Realization of these opportunities is possible due to the ultrafast nanoelectronics with a low energy consumption [21].

Conclusion

This work is dedicated to the main features of the design solutions of the semiconductor electronic components for the devices and systems of the terahertz range — a promising direction for the high-frequency equipment and technology.

The obvious attractive properties of the terahertz radiation, such as big information capacity of the signals, absence of the ionizing influence, ability to penetrate through the opaque objects, etc., determined an active development of the technology of this range in the world.

We should underline especially the opportunities and the prospects for creation of the high-precision systems of arms on the basis of the terahertz technology. In this range, if we compare it with the microwave range, a significantly higher angular resolution of the guidance systems is reached at the smaller sizes of the antennas. At the frequencies of the terahertz range the tactical targets have big areas of scattering. Nowadays, we witness a rather active practical development of the

bottom edge of the terahertz range for development of small-sized, high-precision and highly effective radar-tracking and detection systems, self-homing heads for the tactical weapon systems, and high-speed radio communication lines capable to exchange big volumes of information. Such systems operate in the windows of the atmosphere transparency in the frequency ranges of 94, 145 and 220 GHz.

It is also important to emphasize the inevitability of a gradual transition of the computing systems to the terahertz range of the processors' clock frequencies. Obviously, such systems will change qualitatively the civilian, and, first of all, military technologies. Active research and development of the promising element base for the ultrafast logical circuits is undertaken in the USA and China.

If we talk about the future of the terahertz technology, we believe that this specific area will integrate many valuable qualities of the microwave and optical ranges, and will find many new and practical important applications in various fields of science and technology.

References

1. **Karushkin N. F., Malyshko V. V., Orekhovskij V. A., Tuharinov A. A.** Kommutacionnye upravlyaemye ustrojstva na $p-i-n$ -diodah millimetrovogo diapazona dlin voln, *Tekhnologiya i konstruirovaniye v ehlektronnoj apparature*, 2016, № 4–5, pp. 34–40. (in Russian).
2. **Karushkin N. F.** Ustrojstva dlya pereklyucheniya i modulyacii SVCH moshchnosti v millimetrovom diapazone, *Radiofizika i ehlektronika, Institut radiofiziki i ehlektroniki NAN Ukrainy*, 2004, vol. 9, no. 3, pp. 526 (in Russian).
3. **Karushkin N. F., Obuhov I. A., Smirnova E. A.** Patent of the Russian Federation № 2657324. Primenenie promyshlennogo chasovogo kamnya v kachestve korpusa poluprovodnikovogo ustrojstva millimetrovogo diapazona dlin voln i generator kolebanij s takim ustroystvom (in Russian).
4. **Karushkin N. F.** Harakteristiki bystrodejstvuyushchih amplitudnyh pereklyuchatelej inversnogo tipa millimetrovogo diapazona, *Tekhnika i pribory SVCH*, 2010, no. 1, p. 11–15. (in Russian).
5. **Mayaskaya V.** Osvoenie teragercovoj shcheli. Poluprovodnikovye pribory vtorgayutsya v submillimetrovoj diapason, *Ehlektronika: NTB*, 2011, no. 8, pp. 74–87 (in Russian).
6. **Eru I. I.** Teragercovaya tekhnika i tekhnologiya sovremennoe sostoyanie tendencii razvitiya i perspektivy prakticheskogo primeneniya, *Uspekhi sovremennoj radioehlektroniki*, 1997, no. 3, pp. 51–79 (in Russian).
7. **Bratman V. L., Litvak A. G., Suvorov E. V.** Osvoenie teragercovogo diapazona; istochniki i prilozheniya, *UFN*, 2011, vol. 181, no. 8, pp. 867–874 (in Russian).
8. **Nefedov S. I., Noniashvili M. I., Lagovier A. A., Golubov M. E.** Perspektivy primeneniya millimetrovoj radiolokacii dlya obnaruzheniya i raspoznavaniya nepodviznyh i dvizhushchihysya obektov na fone podstilayushchej poverhnosti, *IV Vserossiyskaya konferenciya Radioehlektronika i radiosvyaz IRE RAN*, 2010, pp. 237–242 (in Russian).
9. **Zubkov A. N., Obuhanich R. V., Karushkin N. F., Prudius I. N., Slerklo L. M.** Perspektivy sozdaniya radiolokacionnyh sistem selekcii i raspoznavaniya slozhnyh celej v millimetrovom diapazone, *Prikladnaya radioehlektronika*, 2002, vol. 1, no. 1, pp. 77–81 (in Russian).
10. **Veremeenko K. K., Zheltov S. Yu., Kim N. V., Sebryakov G. G., Krasilshchikov M. N.** Sovremennye informacionnye tekhnologii v zadachah navigacii i navedeniya bespilotnyh manevrennyh letatelnyh apparatov. Moscow, Fizmatlit, 2009, 556 p. (in Russian).
11. **Anashkin I. M.** Razrabotka aviacionnogo oruzhiya malogo kalibra s mnogorezhimnymi golovkami samonavedeniya za rubezhom, *Vestnik voennoj akademii, Respublika Belarus*, 2012, no. 2, pp. 4–23 (in Russian).
12. **Kaloshin V. A., Chapurskij V. V.** Analiz sistem radioveneniya na osnove diskretnoj multistaticheskoy radiologografii, *Vestnik MGTU im. Baumana. Ser. Priborostroenie*, 2012, pp. 236–250 (in Russian).
13. **Sheen D. M.** et al. Standoff concealed weapon detection using a 350 GHz radar imaging system, *Proc. SPIE*, 2010, vol. 7670, pp. 767008-1–767008-10.
14. **Kazarinov E. D.** Biologicheskie ehffekty ehlektromagnitnogo polya teragercovogo diapazona, *Elektronnaya tekhnika. Seriya 1. SVCH tekhnika*, 2009, no. 4 (508), pp. 48–58. (in Russian).
15. **Beckij O. V., Kislov V. V., Kozmin A. S.** et al. Teragercovye volny i ih primeneniye, *Materialy 17-j Mezhdunarodnoj Krymskoj konferencii "SVCH-tekhnika i telekommunikacionnye tekhnologii" (KryMiKo-2007)*, 2007, pp. 771–773 (in Russian).
16. **Chusseau L., Lampin J.-F., Bollaert S.** et al. THz active devices and applications: a survey of recent researche, *35th European Microwave Conference*, 2005, pp. 1–4.
17. **Beckij O. V., Kirichuk V. F., Krenickij A. P., Lebedeva N. N., Majborodin A. V., Tupikin V. D., Shub G. M.** Teragercovye volny i ih primeneniye Biomedicinskie tekhnologii, *"Biomedicinskie tekhnologii i radioehlektronika "*. 2005, no. 8, pp. 40–48.
18. **Obuhov I. A.** Nekotorye problemy sovremennoj nanoehlektroniki, *Materialy 15-j Mezhdunarodnoj Krymskoj konferencii "SVCH-tekhnika i telekommunikacionnye tekhnologii"*, 2005, pp. 5–7 (in Russian).
19. **Obukhov I.** Some aspects of nanoelectronics development in Russia, *WTEC Workshop Proceedings: Russian Research and Development Activities on Nanoparticles and Nanostructured Materials*, S. Petersburg, 1997, pp. 116–125.
20. **Obukhov I. A.** Planar One-Dimensional Quantum Devices, *Nanoscience and Nanotechnology*, 2013, no. 3 (5), pp. 115–122.
21. **Datta S.** The 21st Century Energy Efficient Logic Transistor, Formerly with Advanced Transistor & Nanotechnology Group Intel Corporation Hillsboro, Oregon, USA, October 9th, 2007, URL: <http://www.sematech.org/meetings/archives/litho/8065/pres/Key%20Note%20Suman%20Datta.pdf>
22. **Ashley T., Barnes A. R., Buckle L., Datta S.** et al. InSb-based Quantum Well Transistor for High Speed, Low Power Applications, URL: <http://csmantech.pairserver.com/Digests/2005/2005papers/14.18.pdf>
23. **Das S. R., Delker C. J., Zakharov D., Yong P. Chen, Sands T. D., Janes D. B.** Room Temperature Device Performance of Electrodeposited InSb Nanowire Field Effect Transistors, *Appl. Phys. Lett.*, 2011, vol. 98, 243504.
24. **Zai-Xing Yang, Ning Han, Fengyun Wang** et al. Carbon doping of InSb nanowires for high-performance p-channel field-effect-transistors, *Nanoscale*, 2013, no. 5, pp. 9671–9676.
25. **Abramov I. I.** Perspektivy ispolzovaniya nanoehlektroniki nanomaterialov i nanotekhnologij v issledovanii i medicine mozga cheloveka, *Nano-i mikrosistemnaya tekhnika*, 2016, vol. 18, no. 1, pp. 49–64 (in Russian).
26. **Abramov I. I.** Soznanie cheloveka ili vozmozhnosti ehlektroniki. Chast I, *Nano-i mikrosistemnaya tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 5, pp. 308–320 (in Russian).
27. **Abramov I. I.** Soznanie cheloveka ili vozmozhnosti ehlektroniki. Chast II, *Nano-i mikrosistemnaya tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 6, pp. 368–384 (in Russian).

А. А. Черепанов, инженер-конструктор, e-mail: cherepanov@sib-is.ru, ООО "СиБИС", г. Новосибирск, аспирант, Новосибирский государственный технический университет,

И. Л. Новиков, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: ilya_novikov@mail.ru, Новосибирский государственный технический университет,

В. Ю. Васильев, д-р хим. наук, проф., зам. ген. директора, e-mail: vasilev@sib-is.ru, ООО "СиБИС", г. Новосибирск

СЧИТЫВАЮЩАЯ ЭЛЕКТРОНИКА ДЛЯ СКВИД-МАГНИТОМЕТРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА. ЧАСТЬ 3. ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ КРИОГЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Поступила в редакцию 26.09.2018

В обзоре предпринята попытка анализа текущего состояния и проводимых исследований и разработок в области считывающей электроники для сверхпроводящих квантовых интерферометров (СКВИД-магнитометров) постоянного тока (пт-СКВИДов). В данной заключительной части работы представлен анализ требований к криогенной полупроводниковой электронике и рассмотрены ее преимущества применительно к схемам считывания пт-СКВИДов. В работе также представлен обзор существующих решений для реализации криогенных низкочастотных малощумящих усилителей, которые являются ключевыми элементами в СКВИД-магнитометрах.

Ключевые слова: сенсоры магнитных полей, магнитометры на основе сверхпроводящих квантовых интерферометров (СКВИД) постоянного тока, криогенные низкочастотные малощумящие усилители

Введение и постановка задачи

СКВИД-магнитометры на сегодняшний день являются самыми прецизионными датчиками магнитного поля, способными детектировать магнитные поля фемтотеслового (фТл) диапазона. Такие магнитометры представляют собой систему, состоящую из сверхпроводящего квантового интерферометра (СКВИДа) и необходимой электронной оснастки (так называемой "считывающей электроники"). Основная особенность таких систем заключается в том, что элемент, чувствительный к магнитному полю, — СКВИД находится в криогенных условиях, а необходимая для работы системы электроника работает в обычном для электронных компонентов температурном интервале ($-60...125$ °С). Это порождает ряд ограничений, которые не позволяют полностью раскрыть весь потенциал измерений магнитного поля с помощью СКВИДа. В предыдущих частях настоящей работы были проанализированы основные ограничения низкотемпературных СКВИДов постоянного тока, не позволяющие использовать их в качестве окончательных устройств для детектирования слабых магнитных полей [1], и подробно рассмотрены схемные решения, которые дают возможность обойти ограничения, связанные с нелинейностью передаточной характеристики пт-СКВИДа (схема фиксации потока) и с высоким уровнем шумов, приведенных ко входу последующего за СКВИДом усилителя (модуляционная схема, схемы с дополнительной положительной связью) [2]. Эти решения усложняют считывающую электронную систему и вносят до-

полнительные ограничения на линейный диапазон и/или полосу исследуемых сигналов.

Полностью криогенная архитектура магнитометра позволяет значительно улучшить и упростить электронную систему. Для этого необходима криогенная электронная компонентная база, способная функционировать в кельвиновом и субкельвиновом диапазоне температур. Однако такая электроника на основе полупроводниковых технологий еще не доработана до уровня промышленного производства.

В этой части работы представлен анализ предлагаемых в литературе решений в данной сфере, рассмотрены основные эффекты, возникающие в полупроводниковой электронике в условиях криогенной температуры, и сделана попытка формирования перечня требований, которым должны удовлетворять современные электронные устройства и их микроэлектронные компоненты для обработки сигналов СКВИДа.

Требования к полупроводниковой криогенной электронике

Для архитектуры полностью криогенного магнитометра на основе низкотемпературного пт-СКВИДа необходима надежная электроника, способная выдерживать воздействие экстремально низких температур субгелиевого диапазона ($<4,2$ К). Современная электронная компонентная база (ЭКБ), как правило, изготавливается на полупроводниковых фабриках согласно предлагаемых ими технологических возможностей в виде стандар-

тизированных маршрутов изготовления по фиксированным проектно-технологическим нормам, например интегральных микросхем (ИМС). Соответственно, разработка ИМС по таким технологиям осуществляется в соответствии с так называемыми Process Design Kit, PDK (правилам проектирования ИМС), которые фактически ограничивают температурный диапазон работоспособности приборов в интервале $-60...125$ °С. Таким образом, предоставляемые производителями ЭКБ стандартизированные PDK не дают возможность оценивать или, тем более, гарантировать работоспособность приборов и сохранение их характеристик вне указанного выше температурного диапазона.

Некоторые эксперименты с охлаждением различных электронных приборов до температуры жидкого азота (77 К) показали работоспособность ЭКБ с незначительным отклонением характеристик при таких температурах (см., например, [3–5]). Охлаждение полупроводниковой электроники ниже "азотной температуры" в большинстве своем приводит или к временным отказам или к фатальной потере работоспособности ЭКБ. Такое поведение напрямую связано с физикой работы полупроводниковых приборов в криогенных условиях и определяется используемой технологией [6, 7]. Отсюда вытекает первое и основное требование к криогенной полупроводниковой ЭКБ для пт-СКВИДов — работоспособность в субгелиевом диапазоне.

Как было показано ранее [1], чувствительность пт-СКВИДа ограничивается уровнем спектральных шумов по напряжению, приведенных ко входу последующего за чувствительным элементом усилителя. Уровень собственных шумов пт-СКВИДа составляет доли $nВ/\sqrt{Гц}$, а шумы лучших общедоступных "комнатных" усилителей составляют примерно $1 nВ/\sqrt{Гц}$. Таким образом, малые сигналы по напряжению, генерируемые пт-СКВИДом при воздействии магнитного потока, скрываются за шумами усилителя, на порядок превышающими уровень собственных шумов чувствительного элемента. Другие криогенные приложения, такие как квантовые биты, также требуют как можно более низкого уровня шумов последующего усилителя, так как это приводит к уменьшению времени декогеренции квантовой системы [8]. Отсюда вытекает второе требование к криогенной полупроводниковой считывающей электронике — низкий уровень спектральной плотности шумов, приведенной ко входу. Для пт-СКВИД-магнитометров необходимо обеспечить эти шумы на уровне собственных шумов СКВИДа.

Современные криостаты позволяют обеспечивать температуру в десятки милликельвинов [9]. В связи с тем что криостаты имеют конечную мощность охлаждения, необходимо обеспечить рассеиваемую мощность системы в соответствии с

возможностью криостата. Для современных криостатов, способных обеспечивать температуру субгелиевого диапазона, мощность охлаждения составляет примерно десятки милливатт в диапазоне температур $1...3$ К. Если считать, что рассеиваемая мощность электронного устройства примерно равна мощности потребления, то для соблюдения заданного температурного режима необходимо обеспечить потребление всей системы на уровне десятков милливатт.

Таким образом, можно сформулировать основные требования к криогенной полупроводниковой электронике:

- работоспособность при криогенных температурах (включая гелиевые температуры);
- низкий уровень собственных шумов (в том числе и фликкер-шума);
- низкое энергопотребление.

Использование криогенной полупроводниковой электроники в схемах считывания сигналов с пт-СКВИДов

В части 2 работы [2] были рассмотрены основные схемы считывания сигналов с пт-СКВИДов в системах прецизионных магнитометров. Данные схемы позволяют обойти ограничения по линейному диапазону входного сигнала (петля фиксации потока) и по шуму комнатного усилителя, последующего за самим СКВИДом (модуляционная схема, схема с дополнительной положительной обратной связью). Эти решения, в свою очередь, усложняют измерительную систему и вносят свои ограничения. В частности, вследствие интерфейсных кабелей между криогенной и комнатной частями системы значительно сокращается рабочая полоса частот всей системы. Рассмотрим, каким образом повлияет использование криогенной электроники в этих схемах.

Прямая схема считывания с петлей фиксации потока в криогенном исполнении. Основное назначение петли фиксации потока (см. рис. 1, *a, b* в работе [2]) — зафиксировать рабочую точку на передаточной характеристике СКВИДа и тем самым значительно расширить линейный диапазон входных сигналов. Реализация в криогенном исполнении усилителя и интегратора позволит отказаться от кабельного интерфейса между "комнатной" и криогенной частями. Это даст возможность снять ограничение системы, связанное со временем задержки на соединительных элементах. В таком случае рабочая полоса частот системы будет определяться лишь электроникой, что позволит проводить измерения высокочастотных сигналов. Для возможности детектировать весь спектр полезных сигналов необходим усилитель, способный работать от нуля герц.

Криогенное исполнение усилителя позволит значительно снизить уровень белого шума, приведенного ко входу, что даст возможность максимально раскрыть потенциал чувствительности пт-СКВИДов. Несмотря на то что с глубоким охлаждением усилителя уровень белого шума обычно значительно снижается, фликкер-шум, или $1/f$ шум, ведет себя неоднозначно: частота среза, при которой начинает доминировать фликкер-шум над белым шумом, может как увеличиваться, так и уменьшаться [10].

Модуляционная схема считывания в криогенном исполнении. Основное назначение модуляционной схемы считывания (см. рис. 2 в работе [2]) заключается в переносе по частоте исследуемого сигнала в область частот, где доминирует белый шум, чтобы исключить влияние фликкер-шумов. Обычно модуляционная схема считывания замыкается через петлю фиксации потока.

Все сказанное выше про реализацию петли фиксации потока в полностью криогенном исполнении справедливо и для этой схемы считывания. При таком подходе рабочая полоса частот будет ограничиваться, в первую очередь, частотой задающего генератора, а шум будет определяться белым шумом усилителя.

Таким образом, применение полупроводниковой криогенной электроники может позволить в значительной степени повысить эффективность СКВИД-магнитометров за счет повышения рабочей полосы схем считывания (уменьшения времени задержки на соединительных кабелях) и за счет уменьшения собственных шумов усилителя с понижением температуры окружающей среды. Наиболее перспективным решением выглядит полностью криогенная прямая схема считывания с петлей фиксации потока. Помимо основных требований к криогенной электронике, описанных ранее, при реализации такого подхода следует добавить требование низкого уровня фликкер-шумов.

Коммерческие специализированные СКВИД-системы

Прежде чем обсуждать криогенные полупроводниковые усилители низкой частоты, стоит упомянуть про существующие решения Hi-End-класса в области специализированных СКВИД-систем. Данные решения являются по сути законченной системой для работы со СКВИДами и содержат на борту всю необходимую электронику, про которую говорилось ранее: необходимые аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи; микроконтроллерное управление; интерфейсы для подключения к персональному компьютеру; программное обеспечение и т. д. Как правило, такие системы очень сложны и функционируют только в

стандартном диапазоне температур, т. е. не приспособлены для криогенных температур. Ранее мы упоминали, что типичные значения спектральной плотности шумов, приведенной ко входу, по напряжению для коммерческих усилителей низкой частоты составляют порядка $1 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$. Однако в специализированных системах эти шумы могут быть ниже в 3 раза, как показано в источниках [11–13]. Входные каскады таких усилителей состоят из биполярных транзисторных пар (или на основе транзисторов, управляемых $p-n$ -переходом). Рабочая полоса таких систем, охваченных петлей фиксации потока, составляет десятки мегагерц. Несмотря на то что шум, приведенный ко входу, достигает рекордно низких значений, он все же примерно в 3 раза выше, чем собственные шумы пт-СКВИДа.

Криогенные полупроводниковые усилители низкой частоты для схем считывания в криогенных приложениях

Самым критичным элементом рассмотренных выше систем является усилитель сигнала. Схемотехника и используемая ЭКБ в значительной степени будут определять характеристики этого устройства. В случае прямой схемы считывания предпочтение отдается усилителям с входным каскадом в виде дифференциальной пары, поскольку полоса усиления таких каскадов начинается с нуля герц.

Стоит отметить, что фликкер-шум полностью определяется физикой работы активного устройства (транзистора) и технологией его изготовления. Так, для каскадов на основе биполярных транзисторов частота среза фликкер-шума значительно меньше, чем для решений на основе полевых транзисторов [14]. Также биполярные транзисторы имеют небольшой технологический разброс [15], что выражается в незначительном напряжении смещения дифференциальной пары.

В случае модуляционной схемы считывания схема усилителя может быть проще, чем при прямой схеме считывания — нет необходимости реализовывать усилитель в виде дифференциальной пары, так как имеется перенос полезного сигнала на частоту осциллятора. В этом случае можно обойтись простейшим однокаскадным усилителем с низким уровнем белого шума и началом полосы пропускания выше частоты среза фликкер-шума выбранного транзистора, т. е. с гальванической развязкой. При таком подходе подойдет как биполярный, так и полевой транзистор.

Ранее было показано [7], что наиболее перспективными для реализации криогенной электроники гелиевого диапазона температур являются технологии создания SiGe Heterojunction Bipolar Transistor (HBT) и InP High Electron Mobility Transistor

(НЕМТ). Хорошим решением для реализации как усилителя, так и прочей криогенной электроники может быть использование криогенного операционного усилителя. На его основе можно реализовать как входной усилитель, так и интегратор и прочие электронные устройства.

Сравнительный анализ характеристик нескольких криогенных низкочастотных усилителей представлен в таблице.

Реализация криогенного дифференциального усилителя на дискретных SiGe HBT транзисторах была предложена в работе [16] для считывания массива из 480 СКВИДов (рис. 1). В качестве усилительного звена используется каскодное включение транзисторов в каждом плече. Нагрузкой этой дифференциальной пары являются резисторы. После усиления сигнал поступает на эмиттерные повторители и далее выводится через витую пару из криостата. Данный усилитель обладает широкой рабочей полосой в 42 МГц и усилением 32 дБ.

В работе [17] была реализована заказная интегральная микросхема для считывания массива СКВИДов по интегральной технологии SiGe HBT 350 нм. В состав данной микросхемы входит низкочастотный дифференциальный усилитель-мультиплексор (рис. 2) с усилением более чем в 100 раз и низким уровнем шумов, приведенных ко входу (0,2 нВ/√Гц). Однако частота среза фликкер-шума велика — порядка 100 кГц. Данный мультиплексор представляет собой N дифференциальных пар, подключенных к общей резистивной нагрузке.

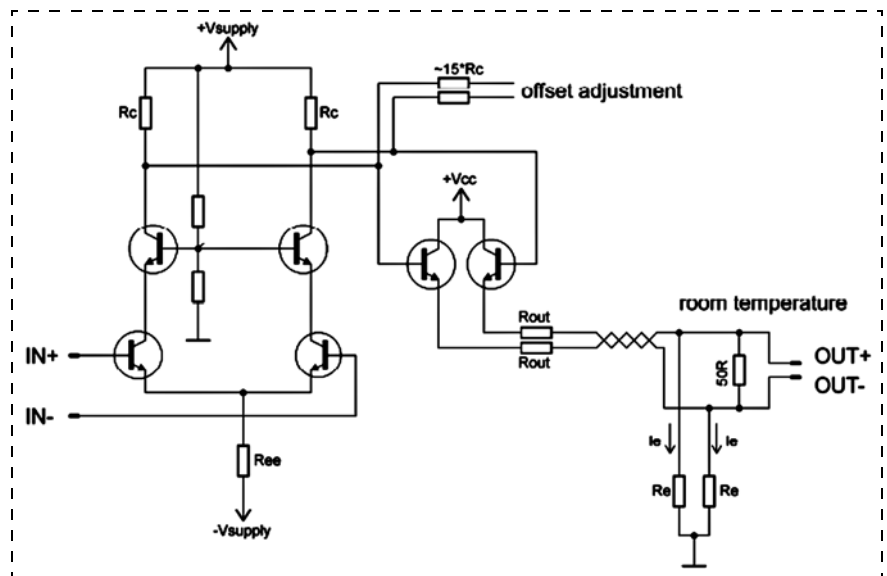


Рис. 1. Схема дифференциального SiGe усилителя
Fig. 1. Schematic of differential amplifier based on SiGe HBT

ке. На одно плечо каждой пары подано опорное напряжение V_0 . На второе поступает усиливаемый сигнал. Выбор необходимого канала мультиплексора осуществляется включением S_N источника тока для N -й дифференциальной пары. Все источники тока подключены к опорному транзистору и образуют вместе с ним токовое зеркало, через которое транслируется опорный ток I_0 в дифференциальные усилители.

Полноценный операционный усилитель был реализован [18] по технологии полностью обедненного КМОП "кремния на изоляторе" (Full Depletion Silicon-On-Insulator, FD-SOI, Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS). Данный усилитель (рис. 3) с усилением свыше 77 дБ имеет достаточно большие фликкер-шумы (19 мкВ/√Гц на 1 Гц). Усилительная часть этого дифференци-

Обобщение информации по криогенным усилителям
Summary for cryogenic amplifiers

Источник Source	Технология Technology	Архитектура Architecture	T , К	Усиление, дБ Gain, dB	Полоса, Гц Bandwidth, Hz	Белый шум, В/√Гц White noise, V/√Hz	Частота среза фликкер-шума, Гц Flicker noise cut-off frequency, Hz
[16]	SiGe HBT (дискретные) (discrete)	Дифференциальный усилитель (Differential amplifier)	4,2	32	$42 \cdot 10^6$	$0,3 \cdot 10^{-9}$	$60 \cdot 10^3$
[17]	SiGe HBT	Заказная ИМС ASIC	4,2	42	$>10^6$	$0,2 \cdot 10^{-9}$	$100 \cdot 10^3$
[18]	FD-SOI CMOS	Операционный усилитель (ИМС) OpAmp (IC)	4,2	77	—	—	$>10^3$
[19]	GaAs JFET	Операционный усилитель (ИМС) OpAmp (IC)	4,2	66	200	—	$>10^3$
[20]	Si JFET*	Сборка на основе дифференциальной пары и операционного усилителя (Assembly of differential pair and OpAmp)	10*	$>120^{**}$	$37 \cdot 10^3$	$0,2 \cdot 10^{-15}^{***}$	—

Примечания: * — входной каскад; ** — усиление дано в [V/A] и выражено в дБ; *** — шумы приведены в единицах А/Гц.
Note: * — input cascade; ** — amplification is provided in v/A and expressed in DB; *** — the noises are presented in A/Hz units.

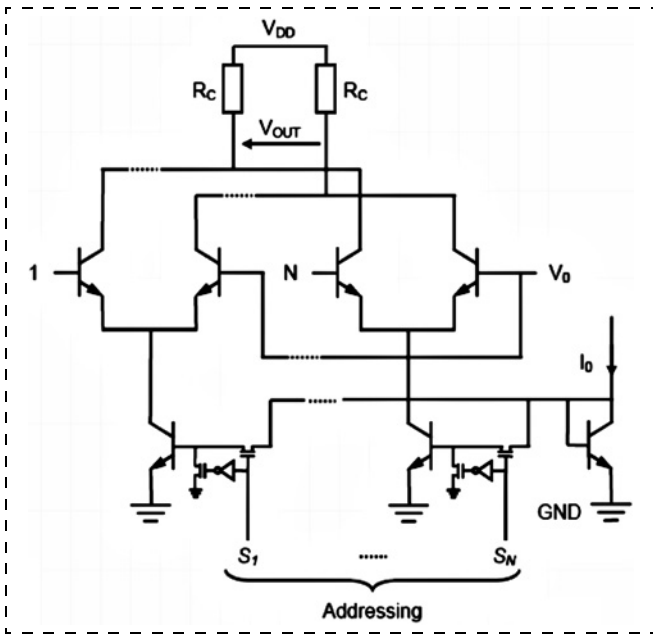


Рис. 2. Схема мультиплексора-усилителя на N каналов в составе заказной интегральной микросхемы для контроля массива пт-СКВИД

Fig. 2. Schematic of N channels multiplexor-amplifier as a part of ASIC for dc-SQUID array control

ального усилителя выполнена по каскадному включению, а нагрузкой служит каскадное токовое зеркало. В качестве выходного каскада используется усилитель класса А с активной нагрузкой.

Еще один операционный усилитель в виде интегральной микросхемы (рис. 4) по технологии GaAs JFET (Junction Field Effect Transistor) описывается в работе [19]. При усилении 66 дБ и частоте единичного усиления 400 кГц данный усилитель имеет шумы $30 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ при 10 кГц. Первый усилительный каскад данного усилителя представляет собой обыкновенную дифференциальную пару с нагрузкой в виде резисторов, во втором каскаде усиления используется активная нагрузка. Такой подход позволяет "отвязаться" от шумов на первом каскаде, и "набрать" необходимое усиление на последующем.

Интересный подход был продемонстрирован в работе [20], где предлагалось устройство трансимпедансного усилителя (преобразователя ток-напряжение) с усилением свыше 10^6 В/А (рис. 5). Предложенное устройство было реализовано на дискретных компонентах: входная дифференциальная пара выполнена на кремниевых транзисторах LS844, управляемых $p-n$ -переходом, оконечный каскад представляет собой КМОП-операционный усилитель TLC271В. Причем входной каскад охлаждается до 10 К, а второй каскад — до 130 К.

Наиболее удачные усилители низкой частоты для криогенных приложений (в том числе и для СКВИД-магнитометров) реализованы на основе SiGe НВТ-транзисторов. Единственным недостатком

представленных выше усилителей можно считать относительно высокий уровень $1/f$ -шума. В работе [16] был проведен дополнительный анализ влияния тока дифференциальной пары на поведение низкочастотного шума. Было показано, что увеличение рабочих токов позволяет снизить частоту среза фликкер-шума на несколько порядков. Однако такой подход ведет к увеличению мощности потребления, что является критичным в криогенных приложениях.

Обсуждение

СКВИД-магнитометры на сегодняшний день являются самыми чувствительными датчиками магнитного поля. Среди подобных магнитометров наибольшей чувствительностью обладают магнитометры на основе пт-СКВИДов с низкой критической температурой, которые функционируют при гелиевых температурах и способны детектировать магнитные поля фемтотеслового диапазона. Для работы такого СКВИДа необходима специально разработанная электронная обвязка, что связано с некоторыми ограничениями самого СКВИД-устройства. Малый линейный диапазон входных сигналов, обусловленный нелинейной передаточной характеристикой пт-СКВИДа, не позволяет детектировать большие по амплитуде сигналы. Фликкершум самого пт-СКВИДа, вызванный флуктуациями критического тока, накладывает ограничения по чувствительности (особенно для высокотемпературных пт-СКВИДов). Малые размеры СКВИДа вносят ограничения по чувствительности к магнитному полю и делают невозможными прецизионные измерения без специальных колец захвата

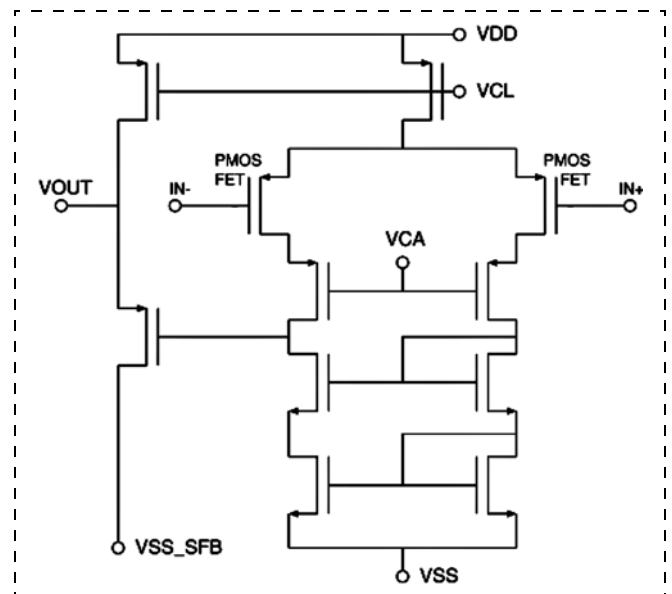


Рис. 3. Схема криогенного операционного усилителя, изготовленного по технологии полностью обедненного КМОП

Fig. 3. Schematic of cryogenic OpAmp manufactured with FD-SOI CMOS technology

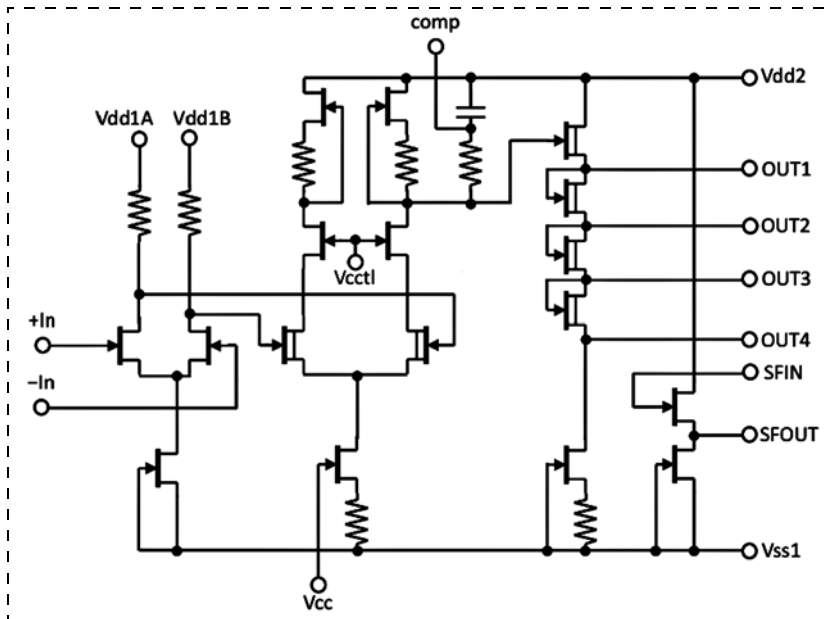


Рис. 4. Схема операционного усилителя, изготовленного по технологии GaAs JFET
Fig. 4. Schematic of cryogenic OpAmp manufactured with GaAs JFET technology

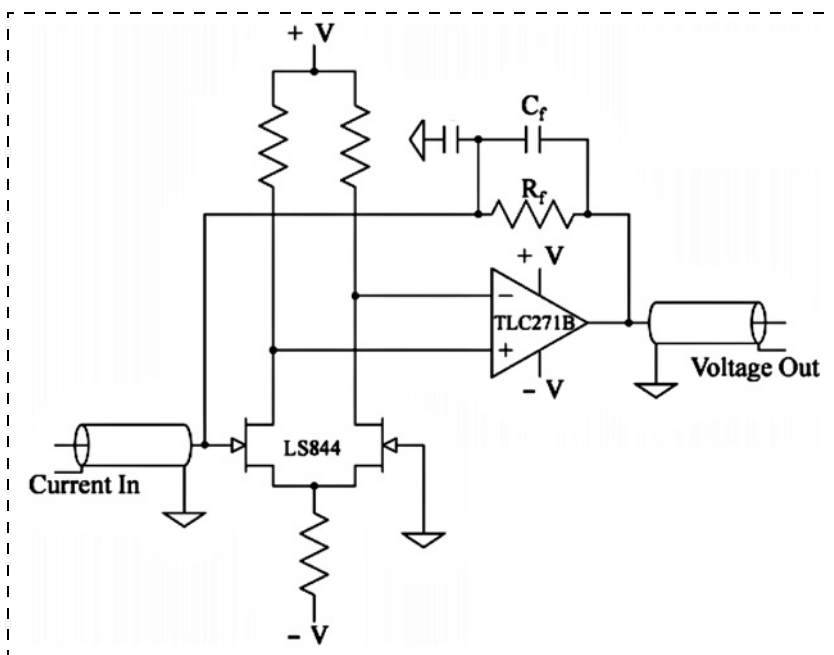


Рис. 5. Схема трансимпедансного усилителя
Fig. 5. Schematic of cryogenic transimpedance amplifier

магнитного потока. К тому же уровень сигнала пт-СКВИДа мал по амплитуде и дальнейшая обработка сигнала требует его усиления.

Дополнительная электронная обвязка позволяет снять указанные ограничения. Так, использование петли фиксации потока дает возможность значительно расширить линейный диапазон входных сигналов, что позволяет измерять сигналы большой амплитуды, а главное — работать в неэкранированной обстановке, так как помимо измеряемых сигналов всегда присутствует магнитный фон окружения. Однако усложнение измерительной сис-

темы вносит свои ограничения в результирующую систему.

Проектирование сложных электронных устройств невозможно без достоверных компьютерных моделей базовых электронных компонентов. Основное препятствие развития криогенной полупроводниковой электроники заключается в отсутствии полных моделей для отдельно выбранной технологии в криогенных условиях.

На данный момент времени существует множество полупроводниковых технологий, позволяющих изготавливать различные микроэлектронные устройства для разных приложений. Однако не существует технологии, гарантирующей оптимальные характеристики в криогенном диапазоне температур. Иными словами, не существует "чисто" криогенной полупроводниковой технологии, оптимизированной для этих целей.

Среди нескольких наиболее удачных решений можно выделить технологию SiGe НВТ. Приборы, изготовленные по этой технологии, претерпевают некоторое ухудшение многих характеристик при криогенных температурах, однако сохраняют свою работоспособность вплоть до субкельвиновых (< 1 К) температур. Поскольку это "объемная" технология, то уровень фликкер-шумов в гетероструктурных транзисторах очень низкий, а существенное усиление тока базы позволяет подобрать оптимальный режим с учетом требований к пониженному энергопотреблению.

Наиболее удачным видится вариант исследования существующих технологических возможностей при криогенных температурах с последующей апробацией на практике.

Исследования конкретной интегральной технологии для криогенных задач видятся следующим образом:

- 1) создание тестовых структур базовых электронных компонентов (транзисторы, резисторы, конденсаторы и т. д.);
- 2) измерение характеристик базовых элементов в условиях криогенных температур;
- 3) расширение существующих моделей базовых элементов на криогенные температуры (или написание новых моделей), как это было показано, например, в источниках [21, 22];

4) разработка сложнотехнологических устройств по расширенным/новым моделям;

5) исследование и измерение разработанных устройств с контролем их характеристик при криогенной температуре;

6) анализ полученных результатов и корректировка моделей (при необходимости).

Данный подход позволит создать полностью криогенный комплекс средств проектирования (PDK — process design kit), ориентированный на создание криогенных ИМС для широкого класса задач и приложений.

Заключение

В результате проведенной работы предпринята попытка анализа текущего состояния и проводимых исследований и разработок в области считывающей электроники для сверхпроводящих квантовых интерферометров постоянного тока с низкой критической температурой. Проанализированы основные ограничения пт-СКВИДов, не позволяющие использовать их как оконечные устройства для детектирования слабых магнитных полей. Причины ограничений связаны: с нелинейностью передаточной характеристики пт-СКВИДа, которая значительно уменьшает линейный диапазон измеряемых сигналов; с малой площадью самого устройства, что снижает чувствительность пт-СКВИДа к магнитному полю; с фликкер-шумами пт-СКВИДа, которые не позволяют в полной мере раскрыть потенциал чувствительности таких магнитометров.

Рассмотрены базовые электронные схемы считывания слабого полезного сигнала со СКВИДов и основные ограничения, вносимые дополнительной электронной обвязкой. Представлен анализ решений в области криогенной электроники как ключевого звена в перспективных системах СКВИД-магнитометров. Сформулированы основные требования к полупроводниковой ЭКБ для работы при криогенных условиях и предложен алгоритм создания на существующей технологической базе современных ИМС для работы в кельвиновых и субкельвиновых диапазонах температур.

Список литературы

1. Черепанов А. А., Новиков И. Л., Васильев В. Ю. Считывающая электроника для СКВИД-магнитометров постоянного тока. Часть 1. СКВИД-магнитометры постоянного тока и их ограничения // Нано- и микросистемная техника. 2019. Т. 21, № 1. С. 40—51.

2. Черепанов А. А., Новиков И. Л., Васильев В. Ю. Считывающая электроника для СКВИД-магнитометров постоянного тока. Часть 2. Системы считывания и их ограничения // Нано- и микросистемная техника. 2019. Т. 21, № 4. С. 234—246.

3. Martina P., Royeta A. S., Caveliera M. et al. Several Issues for Analog Design with a 0.18 μm CMOS Technology at Low Temperature // Ninth International Workshop on Low Temperature Electronics. 2010. P. 35—38.

4. Patterson R. L., Hammoud A., Dickman J. E. et al. Electronic Components and Systems for Cryogenic Space Applications. NASA report. 2010. 7 p.

5. Cherepanov A. A., Novikov I. L., Vasilyev V. Yu. An Evaluation of CMOS Inverter Operation Under Cryogenic Conditions // Proc. of 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). 2018. doi: 10.1109/EDM.2018.8435038.

6. Ying H., Wier B. R., Dark J. et al. Operation of SiGe HBTs Down to 70 mK // IEEE Electron Device Letters. 2016. Vol. 36(1). P. 12—15. doi: 10.1109/LED.2016.2633465.

7. Cherepanov A. A., Vasilyev V. Yu. Integrated low noise amplifiers for cryogenic applications // Proc. of 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). 2017. P. 142—146. doi: 10.1109/EDM.2017.7981729.

8. Wilhelm F. K., Storz M. J., van der Wal C. H. Decoherence of Flux Qubits Coupled to Electronic Circuits // Adv. in Solid State Phys. 2003. P. 763—778. doi: 10.1007/978-3-540-44838-9_54.

9. Novikov I. L., Ivanov B. I., Krivetskiy A. et al. Experimental study of noise parameters in a microwave measurement system for flux qubit readout // Proc. of the Russian Higher School Academy of Sci. 2015. Vol. 26. P. 52—65.

10. Kirschman R. K., Lipa J. A. Further Evaluation of GaAs FETs for Cryogenic Readout // Infrared Detectors and Instrumentation. 1993. P. 350—364.

11. Drung D., Hinnrichs C., Barthelmeß H.-J. Low-noise ultra-high-speed dc SQUID readout electronics // Supercond. Sci. Technol. 2006. Vol. 16. PP. S235—S241. doi: 10.1088/0953-2048/19/5/S15.

12. Magnicon. XXF-1 SQUID Electronics. URL: http://www.magnicon.com/fileadmin/download/datasheets/Magnicon_XXF-1.pdf

13. Supracon. Jena SQUID System Jessy. URL: http://www.supracon.com/files/online/SQUIDElektronik/SQUID_Elektronik.pdf

14. Wilamowski B. M., Irwin J. D. Fundamentals of Industrial Electronics. Second Edition. London, United Kingdom: Taylor & Francis Ltd. 2017. 737 p.

15. Palmer R. DC Parameters: Input Offset Voltage. Application Report. 2001. Texas Instruments. 23 p.

16. Beev N., Kiviranta M. Fully differential cryogenic transistor amplifier // Cryogenics. 2013. Vol. 53. P. 129—133. doi: 10.1016/j.cryogenics.2013.06.004.

17. Voisin F., Prêlea D., Brêlelea E. et al. Cryogenic SiGe ASICs for readout and multiplexing of superconducting detector arrays // Proc. of SPIE. 2016. Vol. 7020: 70202S. P. 8. doi: 10.1117/12.790571.

18. Wada T., Nagata H., Ikeda H. et al. Development of Low Power Cryogenic Readout Integrated Circuits Using Fully-Depleted-Silicon-on-Insulator CMOS Technology for Far-Infrared Image Sensors // J. Low Temp Phys. 2012. Vol. 167. P. 602—608. doi: 10.1007/s10909-012-0461-6.

19. Hibi Y., Matsuo H., Ikeda H. et al. Cryogenic ultra-low power dissipation operational amplifiers with GaAs JFETs // Cryogenics. 2016. Vol. 73. P. 8—13. doi: 10.1016/j.cryogenics.2015.10.006.

20. Proctor J. E., Smith A. W., Jung T. M. et al. High-gain cryogenic amplifier assembly employing a commercial CMOS operational amplifier // Review of Scientific Instruments. 2015. Vol. 86: 073102. 5 p. doi: 10.1063/1.4923277.

21. Petrosyants K. O., Dvornikov O. V., Prokopenko N. N. et al. Extension of Standard SPICE SiGe HBT Models in the Cryogenic Temperature Range // THERMINIC. 2017. P. 5. doi: 10.1109/THERMINIC.2017.8233824.

22. Woods B. O. Device Characterization and Compact Modeling of the SiGe HBT in Extreme Temperature Environments: PhD dissertation. Fayetteville, 2013. 375 p.

A. A. Cherepanov, Postgraduate, cherepanov@sib-is.ru, Designer Engineer, SibIS LLC, 630082, Novosibirsk, Russian Federation, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073, Russian Federation,
I. L. Novikov, Ph. D., Senior Researcher, ilya_novikov@mail.ru, Novosibirsk State Technical University, Senior Researcher of Quantum Cryogenic Electronics Lab., Novosibirsk, Russian Federation,
V. Yu. Vasiliev, D. Sc., Professor, vasiliev@sib-is.ru, Deputy Director General, SibIS LLC, Novosibirsk, 630082, Russian Federation

Corresponding author:

Cherepanov Anton A., Designer Engineer, SibIS LLC, Novosibirsk, 630082, Russian Federation, Postgraduate, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, cherepanov@sib-is.ru

Read-Out Electronics for dc-SQUID Magnetometers. Part 3. Semiconductor Cryogenic Electronics

Received on September on 26, 2018

Accepted on October 17, 2018

This review presents the results of R&D in the field of the read-out electronics for dc Superconducting Quantum Interference Devices (dc-SQUIDs). The third part of the work contains an analysis of certain requirements to the cryogenic semiconductor electronics, its advantages for the SQUID read-out circuits and a review of some cryogenic low-frequency amplifier design solutions as the key elements of the promising magnetometer systems based on dc-SQUIDs.

Keywords: magnetic field sensors, SQUID magnetometers, cryogenic low-noise low-frequency amplifiers

For citation:

Cherepanov A. A., Novikov I. L., Vasiliev V. Yu. Read-Out Electronics for dc-SQUID Magnetometers. Part 3. Semiconductor Cryogenic Electronics, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 5, pp. 298—309.

DOI: 10.17587/nmst.21.298-309

Introduction and problem statement

SQUID magnetometers are the highest precision sensors of the magnetic field capable to detect the magnetic fields of the femtotesla range. Such magnetometers represent a system consisting of the superconducting quantum interferometer (SQUID) and the necessary electronic equipment (the so-called "read-out electronics"). The main feature of such systems is that the element sensitive to the magnetic field — SQUID, has to be in the cryogenic conditions, while the electronics, necessary for operation of the system, works in the temperature range, general for the electronic components ($-60\dots 125$ °C). This presents a number of restrictions, which do not allow us to realize completely all the potential of the measurements of the magnetic field by means of SQUID. In the previous parts we analyzed the main restrictions of the low-temperature SQUIDs of direct current, not allowing us to use them as terminals for detection of weak magnetic fields [1], and presented in detail the circuit solutions, which make it possible to overcome the restrictions connected with the nonlinearity of the transfer characteristic of dc-SQUID (flux-locked loop) and with the high level of input referred noise of the amplifier following the SQUID (the modulation circuit, circuits with additional positive feedback) [2]. These solutions complicate the read-out electronics and introduce additional restrictions for the linear range and/or bandwidth of the studied signals.

A completely cryogenic architecture of the magnetometer allows us to improve and simplify the electronic system considerably. For this purpose, it is necessary to have a cryogenic electronic component base capable to function in the kelvin and subkelvin ranges of temperatures. However, such electronics on the basis of the semiconductor technologies is not yet available at the level of the industrial production.

This part of the work presents an analysis of the solutions proposed in literature in this sphere, the main effects arising in the semiconductor electronics in the conditions of the cryogenic temperature and also an attempt to form a list of requirements, to which the modern electronic devices and their microelectronic components for processing of SQUID signals should correspond.

Requirements to the semiconductor cryogenic electronics

The architecture of a completely cryogenic magnetometer on the basis of a low-temperature dc-SQUID requires reliable electronics capable to withstand the influence of extremely low temperatures of the sub-helium range (<4.2 K). The modern electronic component base (ECB), as a rule, is produced in the semiconductor factories according to the offered technologies in the form of the standardized production routes by the fixed design and technological standards, for example, of the integrated circuits (IC). Respectively, development of IC by such technologies is carried out in accordance

with the Process Design Kit, PDK (rules of IC designing), which actually limit the temperature of operability of the devices within the range of $-60...125$ °C. Thus, the standardized PDK provided by ECB producers do not provide an opportunity to estimate or, the more so, to guarantee operability of the devices and keeping of their characteristics outside the temperature range stated above.

Certain experiments with cooling of various electronic devices down to the temperature of the liquid nitrogen (77 K) demonstrated operability of ECB at such temperatures with an insignificant deviation of their characteristics [3–5]. Cooling of the semiconductor electronics below "the liquid nitrogen temperature", in most cases, results in either temporary failures or a fatal loss of operability of ECB. Such a behavior is directly connected with the physics of operation of the semiconductor devices in the cryogenic conditions and is determined by the applied technology [6, 7]. From here comes the first and the main requirement to the cryogenic semiconductor ECB for the dc-SQUIDs, which is operability in the sub-helium range.

As it was demonstrated above [1], the sensitivity of dc-SQUID is limited by the level of the voltage input referred noise spectral density of the amplifier, following after the sensitive element. The level of the self-noises of dc-SQUID equals to the tenth shares of nV/\sqrt{Hz} , while the noises of the best available "room" amplifiers make about $1 nV/\sqrt{Hz}$. Thus, the small signals by voltage generated by dc-SQUID under the influence of a magnetic flux are hidden behind the noises of the amplifier, which exceed the level of the self-noise of the sensitive element by an order. Other cryogenic applications, such as quantum bits, also demand a minimal level of noise of the subsequent amplifier, because this leads to reduction of the time of decoherence of the quantum system [8]. From here comes the second requirement to the cryogenic semiconductor read-out electronics, which is a low level of input referred noise spectral density. For the dc-SQUID magnetometers it is necessary to ensure these noises at the level of the self-noise of a SQUID.

Modern cryostats allow us to provide temperature in tens of millikelvins [9]. Since the cryostats have the final power of cooling, it is necessary to ensure the dissipated system power in accordance with to the potential of the cryostat. For the modern cryostats, which can provide the temperature of the sub-helium range, the power of cooling is about tens of milliwatts in the range of temperatures of $1...3$ K. If we consider that the dissipated power of an electronic device is approximately equal to the consumption power, then for keeping of the set temperature condition it is necessary to ensure consumption of all the system at the level of tens of milliwatts.

Thus, it is possible to formulate the following main requirements to the cryogenic semiconductor electronics:

- Operability at the cryogenic temperatures (including the helium temperatures);
- Low level of the self-noise (including the flicker noise);
- Low energy consumption.

Use of the cryogenic semiconductor electronics in the read-out circuits for dc-SQUIDs

Part 2 [2] is devoted to the main circuits for reading-out of signals from dc-SQUIDs in the systems of precision magnetometers. These circuits allow us to overcome the restrictions for the linear range of the input signal (flux-locked loop) and for the noise of the room amplifier, following the SQUID (modulation circuit, circuit with additional positive feedback). These solutions, in turn, complicate the measuring system and introduce the restrictions of their own. In particular, owing to the interconnect wires between the cryogenic and room parts of the system the working bandwidth of the frequencies of all the system is reduced considerably. Let us consider the influence of the cryogenic electronics in these circuits.

Direct read-out circuit with a flux-locked loop in the cryogenic version. The main purpose of the flux-locked loop (see fig. 1, *a, b* in [2]) — is to fix a operating point on the transfer characteristic of SQUID and thus expand considerably the linear range of the input signals. Realization of the cryogenic version of the amplifier and integrator will allow us to do away with the interconnect wires between "the room" and the cryogenic parts. This will make it possible to eliminate the limit of the system connected with time delay on the connecting elements. In this case the working bandwidth of the frequencies of the system will be determined only by electronics, which will allow us to take measurements of the high-frequency signals. If we are to detect all the range of the useful signals, we need an amplifier capable to work from the zero hertz level.

The cryogenic version of the amplifier will allow us to reduce considerably the level of the input referred white noise, which will open an opportunity to realize most fully the potential of sensitivity of the dc-SQUIDs. In spite of the fact that usually due to deep cooling of the amplifier the level of the white noise decreases considerably, the flicker noise, or $1/f$ noise, behaves unpredictably: the cutoff frequency, with which the flicker noise begins to dominate over the white noise, can either increase, or decrease [10].

The read-out modulation circuit in the cryogenic version. The basic purpose of the read-out modulation circuit (see fig. 2 in [2]) consists in transfer by the frequency of the studied signal to the area of the frequencies, where the white noise dominates, in order to eliminate the influence of the flicker noises. Usually, the

read-out modulation circuit becomes looped through the flux-locked loop.

Everything told above concerning the realization of a flux-locked loop in a completely cryogenic version is also true for this read-out circuit. At such an approach the working bandwidth of the frequencies will be limited, first of all, by the frequency of the reference generator, while the noise will be determined by the white noise of the amplifier.

Thus, the use of the semiconductor cryogenic electronics can increase substantially the efficiency of a SQUID magnetometer due to an increase of the working bandwidth of the read-out circuits (reduction of the delay time on the interconnect width) and due to reduction of the self-noise of the amplifier with a fall of the temperature of the environment. It seems that the most promising solution is a completely cryogenic direct read-out circuit with a flux-locked loop. Besides the main requirements to the cryogenic electronics described above, the realization of such an approach envisages an additional requirement for the low level of the flicker noises.

Commercial specialized SQUID systems

Before we discuss the cryogenic semiconductor low frequency amplifiers, we should mention the existing Hi-End solutions in the field of specialized SQUID systems. These solutions are in fact a complete system for work with SQUIDs and contain onboard all the necessary electronics, which we discussed earlier: the necessary analog-digital and digital-analog converters, microcontrollers, interfaces for connection to personal computers, software, etc. As a rule, such systems are very complex and function only in the standard range of temperatures, i. e. they are not adapted for the cryogenic temperatures. Earlier we mentioned that the typical values of the voltage input referred noise spectral density for the commercial low frequency amplifiers was about $1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$. However, in the specialized systems these noises can be three times lower, as is shown in the sources [11–13]. The input cascades of such amplifiers consist of the bipolar transistor couples (or based on the transistors controlled by $p-n$ -junction). The working bandwidth of such systems embraced by a flux-locked loop equals to tens of megahertz. Notwithstanding the fact that input referred noise reaches the record-breaking low values, nevertheless, it is approximately three times higher than the self-noises of a dc-SQUID.

Cryogenic semiconductor low frequency amplifiers for the read-out circuits in the cryogenic applications

The most critical element in the systems considered above is the signal amplifier. The circuitry and the used ECB will determine substantially the characteristics of this device. In case of a direct read-out circuit, the preference is given to the amplifiers with the input cascade

in the form of differential pair, because the gain bandwidth of such cascades starts from zero of hertz.

It should be noted that the flicker noise is determined completely by the physics of operation of the active device (transistor) and the technology for its manufacturing. So, for the cascades on the basis of the bipolar transistors the cutoff frequency of the flicker noise is considerably less, than for the solutions on the basis of the field transistors [14]. Besides, the bipolar transistors have smaller technological deviation [15], which is expressed in an insignificant bias voltage of the differential pair.

In case of the modulation read-out circuit the amplifier circuit can be simpler, than in case of a direct read-out circuit — there is no need to realize the amplifier in the form of a differential pair, because a transfer of the useful signal to the oscillator frequency is available. In this case it is possible to manage with the elementary one-cascade amplifier with a low level of white noise and beginning of the transmission band above the cutoff frequency of the flicker noise of the selected transistor, i.e. with a galvanic isolation. At such an approach both the bipolar, and field transistor will do.

As it was demonstrated earlier [7], for realization of the cryogenic electronics of the helium range of temperatures the most promising technologies are the technologies for creation of SiGe Heterojunction Bipolar Transistor (HBT) and InP High Electron Mobility Transistor (HEMT). A good solution for realization of both the amplifier and the other cryogenic electronics can be the use of the cryogenic operational amplifier. On its basis it is possible to realize both the input amplifier, and the integrator, and the other electronic devices.

A comparative analysis of the characteristics of several cryogenic low-frequency amplifiers is presented in the table.

Realization of the cryogenic differential amplifier on discrete SiGe HBT transistors was proposed in the work [16] for the read-out of an array of 480 SQUIDs (fig. 1). As an amplifying stage, the cascode connection of transistors in each shoulder is used. The role of the load in this differential pair is played by the resistors. After amplification the signal arrives to the emitter follower and then is brought through the twisted pair out of the cryostat. This amplifier has a wide working bandwidth of 42 MHz and gain of 32 dB.

In [17] the custom integrated microcircuit for read-out of a SQUID array by the integrated SiGe HBT technology of 350 nm is realized. This microcircuit comprises a low-frequency differential amplifier-multiplexer (fig. 2) with a more than 100 times amplification and a low level of input referred noise ($0.2 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$). However, the cutoff frequency of the flicker noise is high — about 100 kHz. This multiplexer is N of the differential pair, connected to the common resistive load. On one shoulder of each pair the basic voltage of V_0 is

supplied. On the other one the amplified signal arrives. Selection of the necessary channel of the multiplexer is carried out by turning on of S_N source of current for the N differential pair. All the current sources are connected to the basic transistor and together with it they form a current mirror, through which the basic current of I_0 is translated to the differential amplifiers.

The accomplished operational amplifier is realized [18] by technology of Full Depletion Silicon-On-Insulator, FD-SOI, Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS. This amplifier (fig. 3) with gain over 77 dB has a rather big flicker noise ($19 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ at 1 Hz). The amplifying part of this differential amplifier is implemented by the cascode connection, and the load is the cascode current mirror. As the output cascode, the amplifier of class A with an active load is used.

The work [19] describes one more operational amplifier in the form of an integrated circuit (fig. 4) made by GaAs JFET technology (Junction Field Effect Transistor). At the gain of 66 dB and the unity gain frequency of 400 kHz this amplifier has noises of $30 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ at 10 kHz. The first amplifying cascade of this amplifier is an ordinary differential pair with a load in the form of resistors, while in the second cascade of amplification an active load is used. Such an approach allows us "to get rid" of the noises in the first cascade and "get" the necessary amplification in the next one.

An interesting approach was demonstrated in [20], where the device of a transimpedance amplifier (voltage to current convertor) with amplification over 106 V/A (fig. 5) was proposed. The offered device was realized on the discrete components: the input differential pair was made on silicon LS844 transistors controlled by $p-n$ -junction, the terminal cascade was CMOS — operational TLC271B amplifier. At that, the input cascade was cooled down to 10 K, and the second cascade — down to 130 K.

The best low frequency amplifiers for cryogenic applications (including for the SQUID magnetometers) are realized on the basis of SiGe HBT transistors. The only drawback of the above amplifiers can be considered their rather high level of $1/f$ noise. In [16] an additional analysis is carried out of the influence of the current of a differential couple on the behavior of a low-frequency noise. It is demonstrated that an increase of the working currents allows us to reduce the flicker noise cutoff frequency by several orders. However, such an approach leads to a higher power consumption, which is critical in the cryogenic applications.

Discussion

The SQUID magnetometers are the most sensitive sensors of the magnetic field. Among such magnetometers of the greatest sensitivity are the magnetometers on the basis of dc-SQUIDs with a low critical temperature, which function at helium temperatures and can detect the magnetic fields of the femtotesla range. For

operation of such a SQUID a specially developed electronic setup is necessary, which is connected with certain restrictions of the SQUID device itself. A small linear range of the input signals determined by the non-linear transfer characteristic of dc-SQUID does not allow it to detect signals with big amplitude. The flicker noise of dc-SQUID itself, caused by fluctuations of the critical current, imposes restrictions on the sensitivity (especially for the high-temperature dc-SQUIDs). Small SQUID dimensions introduce restrictions by sensitivity to the magnetic field, and make impossible precision measurements without special rings for capture of the magnetic flux. Besides, the signal level of dc-SQUID is of a small amplitude and the further processing of the signal demands its amplification.

An additional electronic setup allows us to overcome the specified limits. So, use of the flux-locked loop allows us to expand considerably the linear range of the input signals, which makes it possible to measure signals of high amplitude, and, above all — to work in an unscreened situation, because besides the measured signals there always is a magnetic background of the environment. However, complication of the measuring system introduces its restrictions into the resulting system.

Designing of complex electronic devices is impossible without reliable computer models of the basic electronic components. The main obstacle to development of the cryogenic semiconductor electronics consists in absence of full models for a separately selected technology in the cryogenic conditions.

At the moment there are many semiconductor technologies allowing to manufacture various microelectronic devices for different applications. However, there is no technology guaranteeing the optimal characteristics in the cryogenic range of temperatures. In other words, there is no "purely" cryogenic semiconductor technology optimized for these purposes.

Out of several most successful solutions it is possible to name SiGe HBT technology. Many characteristics of the devices manufactured by this technology somewhat deteriorate at the cryogenic temperatures, however, they keep their workability up to the sub-kelvin ($< 1 \text{ K}$) temperatures. Since this is a "bulk" technology, the level of the flicker noise in the heterostructural transistors is very low, while an essential amplification of the base current allows us to select the optimal mode taking into account the requirements to the lower energy consumption.

The most successful approach seems to be the research of the existing technological potentials at the cryogenic temperatures with their subsequent approbation in practice.

Research of the concrete integrated technology for the cryogenic tasks are seen as follows:

- 1) Development of the test structures of the basic electronic components (transistors, resistors, condensers, etc.);

- 2) Measurement of characteristics of the basic elements in the conditions of the cryogenic temperatures;
- 3) Expansion of the existing models of the basic elements to the cryogenic temperatures (or writing of new models) as this is shown in [21, 22];
- 4) Development of complex functional devices by the expanded/new models;
- 5) Research and measurement of the developed devices with control of their characteristics at the cryogenic temperatures;
- 6) Analysis of the received results and correction of the models (if necessary).

This approach will allow us to develop a completely cryogenic designing complex (PDK — process design kit) focused on creation of cryogenic IC for a wide class of tasks and applications.

Conclusion

As a result of the carried out work an attempt was made to analyze the current state and the conducted research and development in the field of the read-out electronics for the direct current superconducting quantum interferometers with a low critical temperature. The main restrictions of the dc-SQUIDs were analyzed, which did not allow us to use them as final devices for detection of weak magnetic fields. The reasons for the restrictions were connected: with the nonlinearity of the transfer characteristic of dc-SQUID, which considerably reduced the linear range of the measured signals; with a small area of the device itself, which reduced the sensitivity of dc-SQUID to the magnetic field; with the flicker noises of dc-SQUID, which did not allow us to realize fully the potential of sensitivity of such magnetometers. The basic electronic circuits for the read-out of weak useful signals from SQUIDs and the main restrictions brought by an additional electronic setup were considered. An analysis of the solutions in the field of the cryogenic electronics as the key link for the promising SQUID magnetometer systems was presented. The main requirements to the semiconductor ECB for operation in the cryogenic conditions were formulated and the algorithm of work on the existing technological base of modern IC for operation at kelvin and sub-kelvin temperatures was offered.

References

1. Cherepanov A. A., Novikov I. L., Vasil'ev V. Yu. Schity'vayushhaya e'lektronika dlya SKVID-magnitometrov postoyannogo toka. Chast' 1. SKVID-magnitometry' postoyannogo toka i ix ogranicheniya, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 40—51 (in Russian).
2. Cherepanov A. A., Novikov I. L., Vasil'ev V. Yu. Schity'vayushhaya e'lektronika dlya SKVID-magnitometrov postoyannogo toka. Chast' 2. Sistemy' schity'vaniya i ix ogranicheniya, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 4, pp. 231—246 (in Russian).
3. Martina P., Royeta A. S., Cavelliera M. et al. Several Issues for Analog Design with a 0.18 μm CMOS Technology at

Low Temperature, *Ninth International Workshop on Low Temperature Electronics*, 2010. pp. 35—38.

4. Patterson R. L., Hammoud A., Dickman J. E. et al. Electronic Components and Systems for Cryogenic Space Applications. NASA report. 2010. 7 p.

5. Cherepanov A. A., Novikov I. L., Vasilyev V. Yu. An Evaluation of CMOS Inverter Operation Under Cryogenic Conditions, *19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*. 2018. doi: 10.1109/EDM.2018.8435038.

6. Ying H., Wier B. R., Dark J. et al. Operation of SiGe HBTs Down to 70 mK, *IEEE Electron Device Letters*, 2016, vol. 36 (1), pp. 12—15, doi: 10.1109/LED.2016.2633465.

7. Cherepanov A. A., Vasilyev V. Yu. Integrated low noise amplifiers for cryogenic applications, *18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, 2017, pp. 142—146, doi: 10.1109/EDM.2017.7981729.

8. Wilhelm F. K., Storz M. J., van der Wal C. H. Decoherence of Flux Qubits Coupled to Electronic Circuits, *Adv. in Solid State Phys.*, 2003, pp. 763—778, doi: 10.1007/978-3-540-44838-9_54.

9. Novikov I. L., Ivanov B. I., Krivetskiy A. et al. Experimental study of noise parameters in a microwave measurement system for flux qubit readout, *Proc. of the Russian Higher School Academy of Sci.*, 2015, 2015, vol. 26, pp. 52—65.

10. Kirschman R. K., Lipa J. A. Further Evaluation of GaAs FETs for Cryogenic Readout, *Infrared Detectors and Instrumentation*, 1993, pp. 350—364.

11. Drung D., Hinnrichs C., Barthelmess H.-J. Low-noise ultra-high-speed dc SQUID readout electronics, *Supercond. Sci. Technol.*, 2006, vol. 16, pp. S235—S241. doi: 10.1088/0953-2048/19/5/S15.

12. Magnicon. XXF-1 SQUID Electronics, available at: http://www.magnicon.com/fileadmin/download/datasheets/Magnicon_XXF-1.pdf

13. Supracon. Jena SQUID System Jessy, available at: URL: http://www.supracon.com/files/online/SQUIDElektronik/SQUID_Elektronik.pdf

14. Wilamowski B. M., Irwin J. D. *Fundamentals of Industrial Electronics*. Second Edition. London, Taylor & Francis Ltd. United Kingdom. 2017. 737 p.

15. Palmer R. DC Parameters: Input Offset Voltage. Application Report. 2001. Texas Instruments. 23 p.

16. Beev N., Kiviranta M. Fully differential cryogenic transistor amplifier, *Cryogenics*, 2013, vol. 53, pp. 129—133. doi: 10.1016/j.cryogenics.2013.06.004.

17. Voisin F., Prèlea D., Bréellea E. et al. Cryogenic SiGe ASICs for readout and multiplexing of superconducting detector arrays, *Proc. of SPIE*, 2016. Vol. 7020: 70202S. 8 p. doi: 10.1117/12.790571.

18. Wada T., Nagata H., Ikeda H. et al. Development of Low Power Cryogenic Readout Integrated Circuits Using Fully-Depleted-Silicon-on-Insulator CMOS Technology for Far-Infrared Image Sensors, *J. Low Temp Phys.*, 2012. Vol. 167. P. 602—608. doi: 10.1007/s10909-012-0461-6.

19. Hibi Y., Matsuo H., Ikeda H. et al. Cryogenic ultra-low power dissipation operational amplifiers with GaAs JFETs, *Cryogenics*, 2016. Vol. 73. P. 8—13. doi: 10.1016/j.cryogenics.2015.10.006.

20. Proctor J. E., Smith A. W., Jung T. M. et al. High-gain cryogenic amplifier assembly employing a commercial CMOS operational amplifier, *Review of Scientific Instruments*, 2015. Vol. 86: 073102. 5 p. doi: 10.1063/1.4923277.

21. Petrosyants K. O., Dvornikov O. V., Prokopenko N. N. et al. Extension of Standard SPICE SiGe HBT Models in the Cryogenic Temperature Range, *THERMINIC*, 2017, 5 p. doi: 10.1109/THERMINIC.2017.8233824.

22. Woods B. O. Device Characterization and Compact Modeling of the SiGe HBT in Extreme Temperature Environments: PhD dissertation. Fayetteville, 2013. 375 p.

А. А. Берзин¹, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., e-mail: aaberzin@gmail.com,

А. И. Морозов², д-р физ.-мат. наук, проф., e-mail: mor-alexandr@yandex.ru,

А. С. Сигов¹, академик РАН, президент МИРЭА, e-mail: assigov@yandex.ru,

¹ МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия,

² Московский физико-технический институт (государственный университет), г. Долгопрудный, Московская область, Россия

ЧИСТО АНТИФЕРРОМАГНИТНАЯ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПАМЯТЬ НА ОСНОВЕ Cr_2O_3

Поступила в редакцию 07.12.2018

Рассмотрены физические характеристики бита магнитоэлектрической памяти на основе антиферромагнетика Cr_2O_3 , обладающего линейным магнитоэлектрическим эффектом. Получена оценка для минимального объема бита, обусловленная существованием суперпарамагнитного порога. Сформулированы условия, необходимые для организации процесса считывания с помощью магнитного туннельного соединения. Найдены оптимальные условия для замены постоянного магнитного поля обменным полем ферромагнетика.

Ключевые слова: магнитоэлектрическая память, антиферромагнетик, Cr_2O_3 , суперпарамагнитный порог, магнитное туннельное соединение, шероховатость границ раздела, ферромагнетик

Введение

Необходимость создания магниторезистивной памяти с низким энергопотреблением вызвало интерес исследователей к памяти с записью электрическим полем, прикладываемым к электрочувствительному диэлектрическому слою, чтобы избежать заметных джоулевских потерь [1–4], — MERAM. Наряду с памятью, в которой электрочувствительный слой связан со слоем ферромагнетика, входящим в состав магнитного туннельного соединения (MTJ), обменным взаимодействием спинов [5–8], упругим взаимодействием [9–17] или зарядовой связью [18–21], в работах [22, 23] была предложена память на основе антиферромагнетика-магнитоэлектрика (AF-MERAM).

Если в перечисленных выше видах памяти значение бита задается направлением вектора намагниченности ферромагнитного слоя, то в AF-MERAM оно определяется направлением вектора антиферромагнитного параметра порядка \mathbf{L} соединения Cr_2O_3 [24]. При этом способы записи и считывания также существенно отличаются от применяемых в других видах MERAM.

В основу записи положен линейный магнитоэлектрический эффект [25]. В антиферромагнетиках, обладающих этим эффектом, приложение одновременно постоянных электрического и магнитного полей снимает вырождение энергии состояний, характеризующихся противоположными направлениями \mathbf{L} . Приложение достаточно сильных полей оставляет устойчивым только одно из направлений \mathbf{L} .

В работе [22] в основу считывания положено наличие у антиферромагнетика поверхностной намагниченности, перпендикулярной нескомпенсированной поверхности антиферромагнетика [26]. Направление намагниченности противоположно для двух антипараллельных направлений \mathbf{L} . Оно определяется с помощью аномального эффекта Холла. Тем самым, проводится считывание бита.

В данной работе рассматриваются ограничения на размер бита такой памяти, обусловленные существованием суперпарамагнитного порога, а также требования к качеству границы раздела между слоем Cr_2O_3 и слоем тяжелого металла, служащего для измерения холловского сопротивления (рис. 1, а). Кроме того, будут обсуждены возможности считывания бита с помощью MTJ и замены постоянного магнитного поля обменным полем, создаваемым ферромагнетиком на границе с антиферромагнетиком.

1. Суперпарамагнитный предел

В отсутствие хотя бы одного из двух постоянных электрического и магнитного полей два состояния, отвечающие противоположным направлениям \mathbf{L} , имеют одинаковую энергию и разделены потенциальным барьером. Для успешной эксплуатации бита памяти значение этого барьера должно превосходить $50k_B T$ ($2,0 \cdot 10^{-19}$ Дж для $T = 290$ К), где k_B — постоянная Больцмана; T — температура. В этом случае можно пренебречь вероятностью самопроизвольного переключения бита под действием тепловых флуктуаций за время эксплуатации

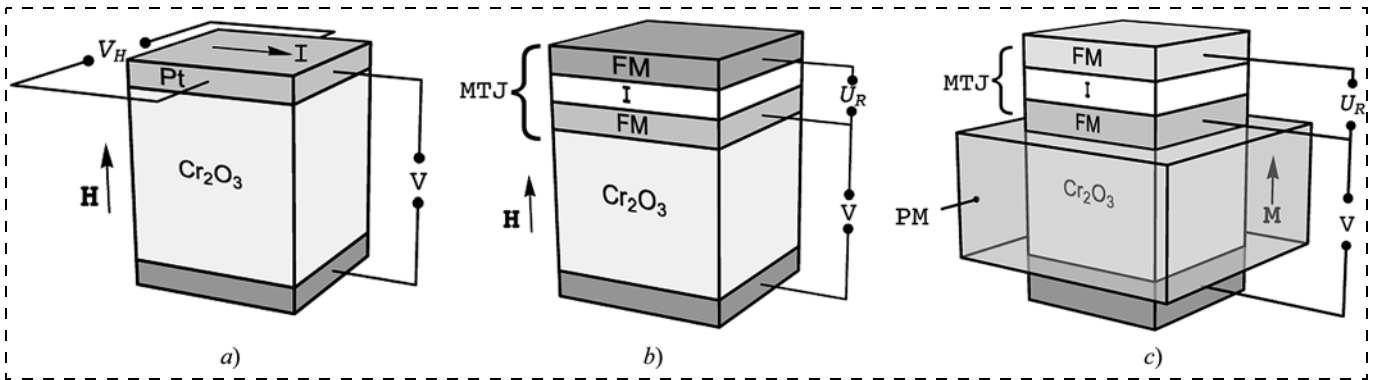


Рис. 1. Бит AF-MERAM со считыванием с помощью аномального эффекта Холла (а); со считыванием с помощью MTJ (б), со считыванием с помощью MTJ и заменой магнитного поля постоянным магнитом (с). Напряжение V создает поле E_z , V_H — холловская разность потенциалов, H — напряженность магнитного поля, FM — ферромагнетик, I — изолятор, U_R — считываемое с MTJ напряжение, PM — постоянный магнит, M — его вектор намагниченности

Fig. 1. AF-MERAM bit based on different read-out mechanisms: anomalous Hall effect (a); MTJ (b); MTJ and a permanent magnet as alternative to the magnetic field (c). The electric field E_z is created by the voltage V , V_H is the Hall voltage difference, H is the magnetic field strength, FM and I denote ferromagnet and insulator, respectively, U_R is the voltage difference across the MTJ, PM denotes permanent magnet, and M is the permanent magnet magnetization vector

памяти. Это требование определяет ограничение на минимальный объем V_{\min} слоя Cr_2O_3 .

Для его оценки запишем магнитоэлектрический вклад в объемную плотность термодинамического потенциала Гиббса Φ_{ME} . Общее выражение для Φ_{ME} приведено в работе [24]:

$$\Phi_{ME} = \gamma_1[(L_x M_y + L_y M_x)P_x + (L_x M_x - L_y M_y)P_y] - \gamma_2[(L_x P_x + L_y P_y)M_z - \gamma_3 L_z (M_x P_x + M_y P_y) - \gamma_4 (L_x M_x + L_y M_y)P_z - \gamma_5 L_z M_z P_z], \quad (1)$$

где $\gamma_i = \text{const}$, а L_i , M_i и P_i — проекции векторов антиферромагнетизма, намагниченности и электрической поляризации на оси ортогональной декартовой системы координат. Ось z — ось третьего порядка тригональной (ромбоэдрической) кристаллической решетки Cr_2O_3 .

В частном случае, когда электрическое и магнитное поля приложены параллельно оси z ,

$$\Phi_{ME} = -\gamma_5 L_z M_z P_z. \quad (2)$$

Поскольку Cr_2O_3 не является ни сегнетоэлектриком, ни ферромагнетиком, т. е. не обладает ни спонтанной электрической поляризацией, ни спонтанной намагниченностью, то

$$M_z = \chi_{zz} H_z, \quad (3)$$

$$P_z = \kappa_{zz} \varepsilon_0 E_z, \quad (4)$$

где χ_{zz} и κ_{zz} — компоненты тензоров магнитной и диэлектрической восприимчивости; ε_0 — константа СИ, а H_z и E_z — соответствующие компоненты напряженностей магнитного и электрического полей.

Подставляя (3) и (4) в (2), находим

$$\Phi_{ME} = -\gamma_5 L_z \kappa_{zz} \chi_{zz} \varepsilon_0 E_z H_z = -\alpha_{zz} E_z H_z, \quad (5)$$

где α_{zz} — компонента тензора прямого линейного магнитоэлектрического эффекта. Из выражения (5)

легко видеть, что при $E_z \neq 0$, $H_z \neq 0$ два состояния, отличающиеся знаком L_z , становятся неэквивалентными.

Оценить значение барьера между этими состояниями, не проводя расчета из первых принципов, можно на основе экспериментальных данных. В работе [22] наблюдали петлю гистерезиса холловского сопротивления в зависимости от приложенного напряжения. Было показано, что в магнитном поле с напряженностью $H_z = 5 \cdot 10^5$ А/м переключение антиферромагнитного параметра порядка из одного состояния в другое происходит при коэрцитивном электрическом напряжении $V = 1,5$ В, приложенном к слою Cr_2O_3 толщиной 200 нм. Это дает значение $E_z = 7,5$ МВ/м и произведение $E_z H_z = 3,8 \cdot 10^{12}$ Вт/м². Используя для Cr_2O_3 значение $\alpha_{zz} = 3,7$ пс/м [27, 28], получим оценку для объемной плотности энергии потенциального барьера U между состояниями с противоположными значениями L_z :

$$U = \alpha_{zz} E_z H_z = 14 \text{ Дж/м}^3. \quad (6)$$

Минимальный объем бита Cr_2O_3 при этом составит $V_{\min} = 50 k_B T / U = 1,4 \cdot 10^{-20}$ м³ = $1,4 \cdot 10^7$ нм³ (например, $240 \times 240 \times 240$ нм).

В работах [29, 30] наблюдалось переключение знака обменного сдвига петли гистерезиса ферромагнитного слоя кобальта, создаваемого слоем Cr_2O_3 . Эта смена знака обменного сдвига связана с изменением знака антиферромагнитного параметра порядка в электрическом и магнитном полях, которое сопровождается изменением направления спинов нескомпенсированной поверхностной атомной плоскости Cr_2O_3 на противоположное. В работе [29] переключение наблюдалось при

$E_z H_z = 3,2 \cdot 10^{12}$ Вт/м², что отличается от приведенного выше значения не более, чем на 20 %.

В работе [30] переключение наблюдалось при температуре 303 К. Для $\mu_0 H_z = 154$ мТл напряженность коэрцитивного электрического поля $E_z = 1,5$ МВ/м, что дает значение $E_z H_z = 1,8 \cdot 10^{11}$ Вт/м². Его уменьшение связано с приближением к температуре Нееля Cr_2O_3 $T_N = 310$ К [24]. Напомним, что уменьшение U ведет к росту V_{\min} .

В работе [23] проводилось микромагнитное моделирование на основе уравнения Ландау — Лифшица — Гильберта, и был сделан вывод, что в образце Cr_2O_3 с размерами $22,5 \times 22,5 \times 60$ нм ($V = 3,04 \cdot 10^{-23}$ м³) антиферромагнитный параметр порядка переключается в полях $E_z = 50$ МВ/м, $H_z = 6$ кЭ = $4,8 \cdot 10^5$ А/м ($E_z H_z = 2,4 \cdot 10^{13}$ Вт/м²), и при этом барьер составляет $46k_B T = 1,86 \cdot 10^{-19}$ Дж. Для объемной плотности энергии барьера получаем $U = 46k_B T/V = 6100$ Дж/м³, что в 440 раз превосходит экспериментальное значение работы [22]. Для значения константы α_{zz} получаем $\alpha_{zz} = U/E_z H_z = 2,5 \cdot 10^{-10}$ с/м, что почти в 70 раз превосходит экспериментальное значение для Cr_2O_3 . Таким образом, можно сделать вывод, что расчет работы [23] не согласуется с экспериментальными данными.

Высокое значение V_{\min} ограничивает возможность масштабирования AF-MERAM на основе Cr_2O_3 на нанометровый диапазон размеров. Использование магнитоэлектриков с более высокими значениями T_N и U потребует более высоких значений напряженности электрического поля и, следовательно, большей электрической прочности материала.

2. Шероховатость границы раздела

Существенные линейные размеры бита ставят перед технологами — создателями AF-MRAM дополнительные задачи. Дело в том, что наличие атомных ступеней на нескомпенсированной поверхности (0001) Cr_2O_3 (скомпенсированная по-

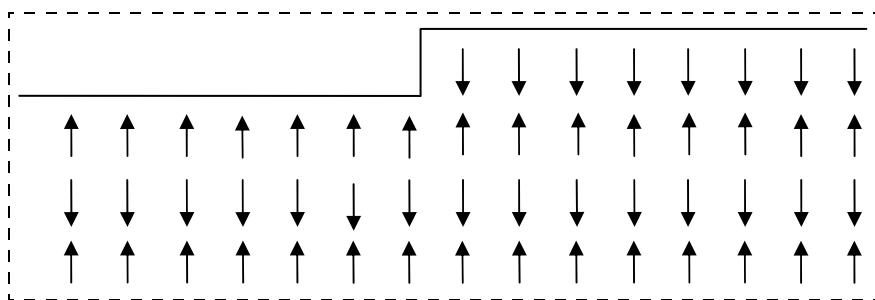


Рис. 2. Атомная ступень на нескомпенсированной поверхности антиферромагнетика. Стрелки указывают направления спинов

Fig. 2. Atomic step on the uncompensated surface of an antiferromagnet. Arrows point spin directions

верхность непригодна для считывания с помощью аномального эффекта Холла) может привести к тому, что лежащие в поверхностной атомной плоскости ионы хрома по разные стороны края ступени будут принадлежать к разным магнитным подрешеткам антиферромагнетика (рис. 2). Поэтому поверхностная намагниченность будет иметь противоположные направления по разные стороны края ступени [26], что приведет к ее эффективной компенсации [31].

Если поверхность раздела магнитоэлектрик — тяжелый металл будет разбита атомными ступенями на участки с противоположным направлением поверхностной намагниченности, то при считывании с помощью аномального эффекта Холла будет происходить усреднение сигнала. Поэтому требуется достичь атомной гладкости границы раздела при размерах несколько сотен нанометров, что является непростой задачей.

Следует отметить, что в работе [30] утверждается, что подобные ступени на поверхности (0001) Cr_2O_3 не возникают. Для окончательного решения данного вопроса необходима дополнительная информация о структуре и концентрации атомных ступеней на границе раздела Cr_2O_3 — тяжелый металл.

3. Считывание с помощью МТJ

В работе [23] был предложен метод считывания с помощью МТJ. Для такого считывания необходимо, чтобы состояниям бита "0" и "1" отвечало противоположное направление намагниченности "свободного" ферромагнитного слоя, входящего в состав МТJ (см. рис. 1, б). Она должна переключаться в момент записи бита вместе с направлением вектора антиферромагнетизма слоя Cr_2O_3 . Связь между этими двумя слоями обусловлена обменным взаимодействием спинов граничной атомной плоскости Cr_2O_3 со спинами атомов граничной атомной плоскости ферромагнитного слоя. Это взаимодействие приводит к обменному сдвигу петли гистерезиса ферромагнитного слоя. Противоположным направлениям вектора антиферромагнетизма соответствуют противоположные значения поля обменного сдвига H_{EB} .

Для того чтобы изменение знака H_{EB} приводило к 180° разворота вектора намагниченности свободного ферромагнитного слоя, необходимо и достаточно, чтобы H_{EB} удовлетворяло неравенству

$$H_{EB} > H_z + H_c, \quad (7)$$

где H_c — напряженность коэрцитивного поля ферромагнитного слоя (рис. 3).

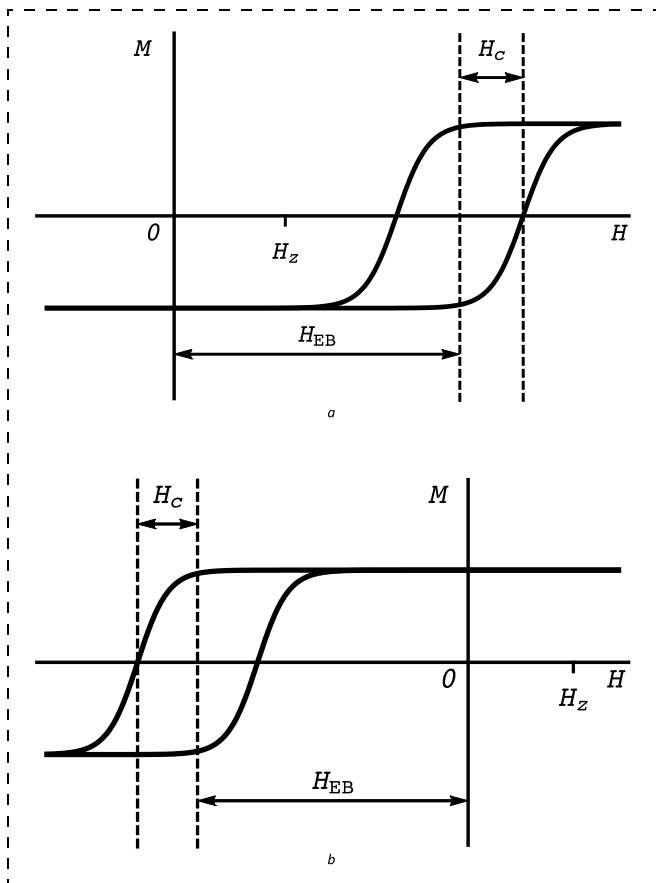


Рис. 3. Петли гистерезиса свободного ферромагнитного слоя при положительном (а) и отрицательном (б) поле обменного сдвига
 Fig. 3. Hysteresis loops of a free ferromagnetic layer for positive (a) and negative (b) exchange bias

В работе [29] для слоя кобальта, входящего в систему $\text{Cr}_2\text{O}_3(250 \text{ нм})/\text{Pt}(1 \text{ нм})/\text{Co}(1 \text{ нм})$, было получено значение $H_{EB} = 160 \text{ Э}$, что более, чем на порядок, меньше постоянного магнитного поля $H_z = 6 \text{ кЭ}$. Столь низкое значение H_{EB} может быть связано с наличием атомных ступеней на границе раздела слоев, приводящих к усреднению обменного сдвига по причинам, обсужденным в разд. 2. Для считывания с помощью МТJ в постоянном магнитном поле необходимо так подобрать материал свободного ферромагнитного слоя и обеспечить такое качество границы раздела, чтобы на поверхности слоя Cr_2O_3 обменный сдвиг его петли гистерезиса достигал значения порядка 1 Тл.

4. Замена внешнего магнитного поля обменным

Альтернативный вариант памяти без использования постоянного магнитного поля был предложен в работе [23]. Внешнее магнитное поле планируется заменить обменным полем H_e жесткого ферромагнетика (постоянного магнита), располагаемого по периметру боковой поверхности слоя Cr_2O_3 (см. рис. 1, с). При этом поверхность Cr_2O_3 должна быть скомпенсированной, поскольку в противном случае нескомпенсированной поверхности

сильное гейзенберговское взаимодействие спинов одной из подрешеток ионов хрома со спинами ферромагнетика, намного превосходящее магнитоэлектрическое взаимодействие, стабилизирует одно из значений L_z , которое отвечает минимуму обменной энергии, и переориентация L_z становится невозможной.

Следует отметить, что обменное поле является короткодействующим, можно считать, что оно действует в области объемом $4bha$, где b — межатомное расстояние; h — высота слоя Cr_2O_3 , выбранного в форме прямоугольного параллелепипеда с квадратным основанием; a — сторона основания. В сильном обменном поле на скомпенсированной поверхности Cr_2O_3 возникнет спин-флоп ориентация, т. е. произойдет опрокидывание его антиферромагнитных подрешеток, и вектор \mathbf{L} ориентируется перпендикулярно вектору намагниченности ферромагнетика [32]. Как показано в работе [33], при наличии в слоях параллельных легких осей анизотропии, как это имеет место в рассматриваемом случае, вблизи границы раздела слоев возникает обменная спираль (рис. 4).

В глубине слоев вектор \mathbf{L} и вектор намагниченности ферромагнетика \mathbf{M}_f коллинеарны легкой оси z . Угол φ , который вектор намагниченности граничной атомной плоскости ферромагнетика образует с легкой осью, зависит от соотношения между поверхностными энергиями блоховских доменных стенок в слоях w_{af} и w_f :

$$\text{tg}\varphi = \frac{w_{af}}{w_f}. \quad (8)$$

В случае $w_{af} \gg w_f$ $\varphi \approx \pi/2$ и практически вся спираль расположена в слое ферромагнетика. Если ферромагнетик жесткий, как это предполагалось в

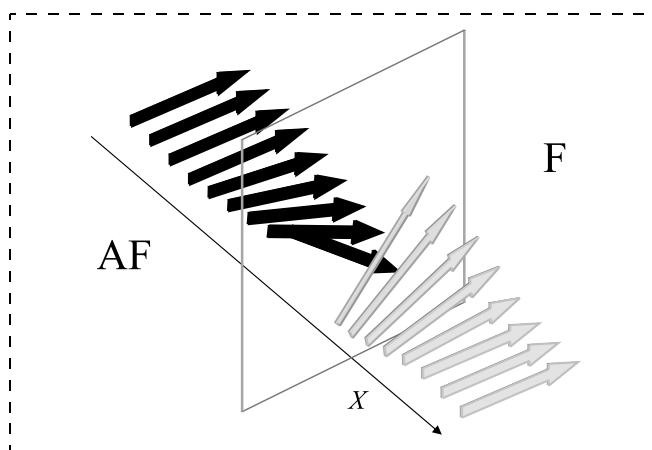


Рис. 4. Обменная спираль вблизи границы раздела ферромагнетик (F) — антиферромагнетик (AF). Черные стрелки показывают направление вектора \mathbf{L} , белые — вектора намагниченности ферромагнетика
 Fig. 4. Exchange spiral near the ferromagnet (F) / antiferromagnet (AF) interface. Black and white arrows point vector \mathbf{L} and ferromagnet magnetization vector directions, respectively

работе [23], то $w_{af} \ll w_f$, $\varphi = 0$ и практически вся обменная спираль расположена в слое Cr_2O_3 .

В рассматриваемом случае, когда ось x перпендикулярна границе раздела слоев

$$\Phi_{ME} = -(\gamma_4 L_y M_y + \gamma_5 L_z M_z) P_z. \quad (9)$$

В случае жесткого ферромагнетика на поверхности Cr_2O_3 $L_z(0) \approx 0$ и $M_y(0) \approx 0$. Следовательно, равно нулю и магнитоэлектрическое взаимодействие. Наведенный в антиферромагнетике обменным полем магнитный момент спадает на атомных расстояниях [34], много меньших размера области существования обменной спирали, который порядка толщины блоховской доменной стенки в данном материале [33]. Поэтому, в первом приближении, в той области Cr_2O_3 , в которой $M_z \neq 0$, значения L_z и M_y равны нулю. Таким образом, использование жесткого ферромагнетика является нецелесообразным.

При произвольном значении φ вблизи поверхности Cr_2O_3 (рис. 5)

$$\Phi_{ME} = \frac{1}{2}(\gamma_4 - \gamma_5)LM \sin 2\varphi P_z. \quad (10)$$

Отсюда следует первая рекомендация: материал ферромагнетика должен быть подобран так, чтобы $w_{af} \approx w_f$. Тогда $\sin 2\varphi \approx 1$, и действие обменного поля будет наиболее эффективным.

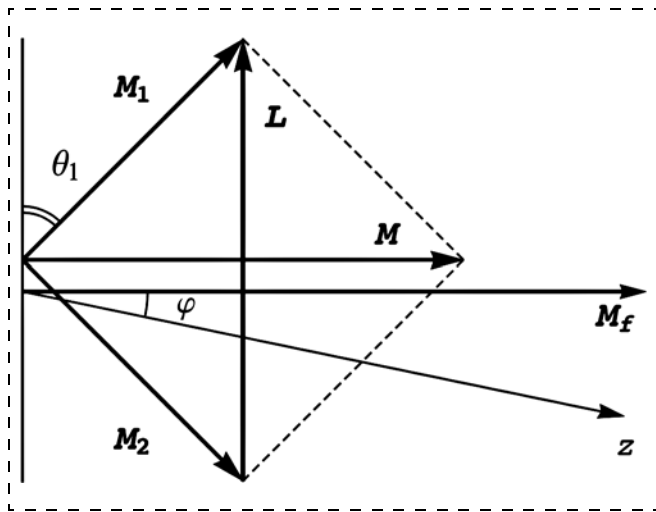


Рис. 5. Спин-флоп ориентация на границе раздела ферромагнетик — антиферромагнетик: M_1, M_2 — намагниченности подрешеток верхней атомной плоскости антиферромагнетика; M — результирующая намагниченность; L — вектор антиферромагнетизма; M_f — намагниченность ферромагнетика; z — легкая ось; θ_1 — угол скоса намагниченностей антиферромагнитных подрешеток в граничной атомной плоскости

Fig. 5. Spin-flop orientation on the ferromagnet / antiferromagnet interface: M_1, M_2 are magnetizations of the sublattices of the upper atomic plane of the antiferromagnet, M is the resulting magnetization, L is the antiferromagnetism vector, M_f is the ferromagnet magnetization, z is the easy axis, and θ_1 is the tilt angle of the magnetizations of antiferromagnetic sublattices in the boundary atomic plane

Найдем теперь оптимальное значение этого поля. Поскольку произведение LM отлично от нуля только в нескольких атомных плоскостях вблизи поверхности Cr_2O_3 , при оценке его значения можно пренебречь закручиванием обменной спирали и ограничиться обменным приближением [34]. Пронумеруем атомные плоскости Cr_2O_3 , параллельные границе раздела индексом i , начиная от поверхности. Для простоты ограничимся двух-, а не четырех-подрешеточным приближением. Пусть угол θ_i — угол скоса антиферромагнитных подрешеток в i -й атомной плоскости (угол θ_1 изображен на рис. 5). Будем считать модуль намагниченностей подрешеток Cr_2O_3 неизменным и равным \tilde{M} . Тогда модуль L_i вектора антиферромагнетизма и модуль M_i вектора намагниченности, принадлежащих i -й атомной плоскости, равны $L_i = 2\tilde{M} \cos \theta_i$, $M_i = 2\tilde{M} \sin \theta_i$. Поверхностный вклад в Φ_{ME} пропорционален величине $\sum_i L_i M_i = 2\tilde{M}^2 \sum_i \sin 2\theta_i$. В силу быстрой сходимости данной суммы ограничимся для оценки первым слагаемым. Максимум Φ_{ME} достигается при $\theta_1 = \pi/4$. Значение θ_1 определяется конкуренцией энергии $W_{f,af}$ межслойного обменного взаимодействия и энергии W_{af} обменного взаимодействия в Cr_2O_3 . В приближении малых углов в работе [34] для нее было получено следующее аналитическое выражение:

$$\theta_1 = \xi \frac{W_{f,af}}{W_{af}}. \quad (11)$$

Фактор $\xi \approx 1$ зависит от вида кристаллических решеток слоев.

Таким образом, можно сформулировать второе требование для выбора ферромагнитного слоя: он должен обеспечить оптимальное значение угла скоса подрешеток на поверхности Cr_2O_3 .

Найдем ограничения на размеры бита памяти, обусловленные существованием суперпарамагнитного порога. В случае использования магнитного поля $L_z = 2\tilde{M}$; $M_z = \chi_{zz} H_z$; $L_z M_z = 2\tilde{M} \chi_{zz} H_z$, а в рассматриваемом нами случае оптимальное значение $L_z M_z = \tilde{M}^2$. Поэтому новое значение минимального объема \tilde{V}_{\min} равно

$$\tilde{V}_{\min} = V_{\min} \frac{2\chi_{zz} H_z}{\tilde{M}}. \quad (12)$$

Используя для χ_{zz} значение $1,2 \cdot 10^{-4}$ (СГС) [29], значение магнитного момента иона хрома 2,48 магнетона Бора [35], а также значение плотности Cr_2O_3 $5,22$ г/см³, находим значение $\tilde{M} = 4,76 \cdot 10^5$ А/м и $\tilde{V}_{\min} = 2,5 \cdot 10^{-3} V_{\min} = 3,6 \cdot 10^{-23}$ м³ = $3,6 \cdot 10^4$ нм³. Полагая $b = 0,5$ нм, получаем $(ah)_{\min} = 2 \cdot 10^4$ нм².

Таким образом, даже в оптимальном случае, при использовании обменного поля линейные размеры бита превышают 100 нм.

Заклучение

Получена оценка для минимального объема бита AF-MRAM на основе Cr_2O_3 , обусловленного суперпарамагнитным порогом, $V_{\min} = 1,4 \cdot 10^7 \text{ нм}^3$.

Сформулированы требования к значению обменного сдвига, позволяющего использовать для считывания в постоянном магнитном поле магнитное туннельное соединение.

Показано, что оптимальным условиям замены внешнего магнитного поля обменным полем ферромагнетика соответствуют такие физические параметры ферромагнетика, которые обеспечивают на поверхности Cr_2O_3 значения угла между вектором антиферромагнетизма и легкой осью и угла скоса подрешеток, близкие к $\pi/4$.

Исследование поддержано грантом РНФ (проект 17-12-01435).

Список литературы

1. Thomas R., Scott J. S., Bose D. N., Katiyar R. S. Multiferroic thin-film integration onto semiconductor devices // J. Phys.: Cond. Matt. 2010. Vol. 22, 423201 (17 p.).
2. Ma J., Hu J., Li Z., Nan C.-W. Recent Progress in Multiferroic Magnetoelectric Composites: from Bulk to Thin Films // Adv. Matter. 2011. Vol. 23, N. 9. P. 1062–1087.
3. Морозов А. И. Переключение намагниченности ферромагнетика электрическим полем (Обзор) // ФТТ. 2014. Т. 56, № 5. С. 833–840.
4. Hu J.-M., Chen L.-Q., Nan C.-W. Multiferroic heterostructures integrating ferroelectric and magnetic materials // Advanced Materials. 2016. Vol. 28, N. 1. P. 15–39.
5. Морозов А. И., Сигов А. С. Перемагничивание электрическим полем в двухслойной структуре ферромагнетик–магнитоэлектрик // Нано- и микросистемная техника. 2012. Т. 10, № 10. С. 10–14.
6. Morosov A. I., Sigov A. S. Magnetoresistive Memory with Recording by Electric Field: Is the Weak Ferromagnetism Necessary? // J. Magn. Magn. Mater. 2015. Vol. 383. P. 242–245.
7. Винокуров Д. Л., Морозов А. И. Обменная связь нанослоя мультиферроика BiFeO_3 с нанослоем ферромагнетика $\text{Co}_0,9\text{Fe}_{0,1}$ // ФТТ. 2015. Т. 57, № 9. С. 1736–1741.
8. Берзин А. А., Винокуров Д. Л., Морозов А. И. Эволюция вектора антиферромагнетизма мультиферроика BiFeO_3 в процессе переключения его сегнетоэлектрической поляризации // ФТТ. 2016. Т. 58, № 11. С. 2237–2241.
9. Pertsev N. A. Giant magnetoelectric effect via strain-induced spin reorientation transitions in ferromagnetic Films // Phys. Rev. B. 2008. Vol. 78, 212102 (4 p.).
10. Hu J.-M., Nan C. W. Electric-field-induced magnetic easy-axis reorientation in ferromagnetic/ferroelectric layered heterostructures // Phys. Rev. B. 2009. Vol. 80, 224416 (11 p.).
11. Pertsev N. A., Viaud G., Dkhil B. Polarization-controlled spin reorientation and resistive switching in ferromagnet-ferroelectric nanostructures and tunnel junctions // Phys. Rev. B. 2014. Vol. 90, 024426 (8 p.).
12. Wu T., Bur A., Wong K. et al. Electrical control of reversible and permanent magnetization reorientation for magnetoelectric memory devices // Appl. Phys. Lett. 2011. Vol. 98, 262504 (3 p.).
13. Buzzi M., Chopdekar R. V., Hockel J. L. et al. Single domain spin manipulation by electric fields in strain coupled artificial multiferroic nanostructures // Phys. Rev. Lett. 2013. Vol. 111, 027204 (5 p.).
14. Zhang S., Zhao Y., Xiao X. et al. Giant electrical modulation of magnetization in $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}/\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0,7}\text{Ti}_{0,3}\text{O}_3$ (011) heterostructure // Sci. Rep. 2014. Vol. 4, 3727 (7 p.).
15. Wu T., Bur A., Zhao P. et al. Giant electric-field-induced reversible and permanent magnetization reorientation on magnetoelectric $\text{Ni}/(011) [\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3]_{(1-x)}-[\text{PbTiO}_3]_x$ heterostructure // Appl. Phys. Lett. 2011. Vol. 98, 012504 (3 p.).
16. Morosov A. I., Sigov A. S. "Long leg" magnetoelectric memory // J. Appl. Phys. 2014. Vol. 115, 223909 (4 p.).
17. Морозов А. И. Магниторезистивная память с записью электрическим полем на основе упругого взаимодействия слоев // Нано- и микросистемная техника. 2017. Vol. 19, N. 12. С. 744–751.
18. Duan C.-G., Velev J. P., Sabirianov R. F. et al. Surface Magnetoelectric Effect in Ferromagnetic Metal Films // Phys. Rev. Lett. 2008. Vol. 101, 137201 (4 p.).
19. Cai T., Ju S., Lee J. et al. Magnetoelectric coupling and electric control of magnetization in ferromagnet/ferroelectric/normal-metal superlattices // Phys. Rev. B. 2009. Vol. 80, 140415 (4 p.).
20. Nan T., Zhou Z., Liu M. et al. Quantification of strain and charge co-mediated magnetoelectric coupling on ultra-thin Permalloy/PMN-PT interface // Sci. Rep. 2014. Vol. 4, 3688 (6 p.).
21. Cherifi R. O., Ivanovskaya V., Phillips L. C. et al. Electric-field control of magnetic order above room temperature // Nature Materials. 2014. Vol. 13, N. 4. P. 345–351.
22. Kosub T., Kopte M., Huhne R. et al. Purely antiferromagnetic magnetoelectric random access memory // Nature communications. 2017. Vol. 8, 13985 (7 p.).
23. Ahmed R., Victoria R. H. A fully electric field driven scalable magnetoelectric switching element // Appl. Phys. Lett. 2018. Vol. 112, 182401 (4 p.).
24. Туров Е. А., Колчанов А. В., Меньшенин В. В. и др. Симметрия и физические свойства антиферромагнетиков. М.: Физматлит, 2001. 560 с.
25. Астров Д. Н. Магнитоэлектрический эффект в оксиде хрома // ЖЭТФ. 1961. Т. 40, № 4. С. 1035–1041.
26. Андреев А. Ф. Макроскопические магнитные поля антиферромагнетиков // Письма в ЖЭТФ. 1996. Т. 63, вып. 9. С. 724–728.
27. Fiebig M. Revival of the magnetoelectric effect // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. Vol. 38, N 8. P. R123–R152.
28. Rivera J.-P. On definitions, units, measurements, tensor forms of the linear magnetoelectric effect and on a new dynamic method applied to Cr–Cl boracites // Ferroelectrics. 1994. Vol. 161. P. 165–180.
29. Ashida T., Oida M., Shimomura N. et al. Observation of magnetoelectric effect in $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Pt}/\text{Co}$ thin film system // Appl. Phys. Lett. 2014. Vol. 104, 152409 (3 p.).
30. He X., Wang Y., Wu N. et al. Robust isothermal electric control of exchange bias at room temperature // Nature Mater. 2010. Vol. 9. P. 579–585.
31. Dho J., Blamire M. G., Chi E. O. Correlation of the exchange interaction in $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Cr}_2\text{O}_3$ bilayers with the antiferromagnetic spin configuration // Phys. Rev. B. 2005. Vol. 72, 224421 (7 p.).
32. Koon N. C. Calculations of exchange bias in thin films with ferromagnetic/antiferromagnetic interfaces // Phys. Rev. Lett. 1997. Vol. 78, N. 25. P. 4865–4868.
33. Морозов А. И., Рынков Д. О. Магнитная структура границы раздела системы ферромагнетик – антиферромагнетик с параллельными осями анизотропии // ФТТ. 2007. Т. 49, вып. 10. С. 1849–1852.
34. Морозов А. И. Магнитная структура компенсированной границы раздела ферромагнетик – антиферромагнетик // ФТТ. 2003. Т. 45, вып. 10. С. 1847–1849.
35. Brown P. J., Forsyth J. B., Lelièvre-Berna E., and Tasset F. Determination of the magnetization distribution in Cr_2O_3 using spherical neutron polarimetry // J. Phys.: Condens. Matter. 2002. Vol. 14, N. 8. P. 1957–1966.

A. A. Berzin¹, Ph. D., Senior Researcher, e-mail: aaberzin@gmail.com,

A. I. Morosov², D. Sc., Professor, e-mail: mor-alexandr@yandex.ru,

A. S. Sigov¹, Academician of RAS, MIREA President, e-mail: assigov@yandex.ru,

¹ MIREA — Russian Technological University, 78 Vernadskiy Ave., 119454 Moscow, Russian Federation,

² Moscow Institute of Physics and Technology (State University), 9 Institutskiy per., 141700 Dolgoprudny, Moscow Region, Russian Federation

Corresponding author:

Morosov Alexander I., D. Sc., Professor, Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Institutskiy per. 9, Dolgoprudny, Moscow Region, 141700 Russian Federation, e-mail: mor-alexandr@yandex.ru

Purely Antiferromagnetic Magnetoelectric Memory Based on Cr₂O₃

Received on December 07, 2018

Accepted on January 14, 2019

*The authors considered the physical characteristics of a magnetoelectric memory bit based on the antiferromagnetic Cr₂O₃ with the linear magnetoelectric effect. If in many kinds of the magnetic memory the bit value depends on the direction of the magnetization vector of the ferromagnetic layer, in this memory it is determined by the direction of the antiferromagnetic order parameter vector **L** of the Cr₂O₃ compound. The recording process is based on the linear magnetoelectric effect. In the antiferromagnets with this effect, a simultaneous application of the constant electric and magnetic fields eliminates the degeneracy in the energy of states characterized by the opposite directions of vector **L**. Application of the sufficiently strong fields remains stable only for one of vector **L** directions. The basis for reading is the presence of an antiferromagnet with a surface magnetization, perpendicular to the uncompensated surface of the antiferromagnet. The magnetization direction is opposite for two antiparallel directions of vector **L**. This was discovered due to the anomalous Hall effect. Thus, the bit was read out. The minimal value of the bit volume $V_{min} = 1.4 \cdot 10^7 \text{ nm}^3$ was estimated with account of the existence of the superparamagnetic threshold. The conditions necessary for the read-out process with the use of the magnetic tunnel junction (MTJ) were formulated: the magnitude of the exchange bias must exceed the sum of the external and the coercive fields. It was demonstrated that the optimal conditions for replacing of the external magnetic field with the ferromagnetic exchange field corresponded to such physical parameters of the ferromagnet, which ensured the values of the angle between the antiferromagnetism vector and the easy axis and the tilt angle of the sublattices close to $\pi/4$ on the Cr₂O₃ surface.*

Keywords: magnetoelectric memory, antiferromagnet, Cr₂O₃, superparamagnetic threshold, magnetic tunnel junction, interface roughness, ferromagnet

For citation:

Berzin A. A., Morosov A. I., Sigov A. S. Purely Antiferromagnetic Magnetoelectric Memory Based on Cr₂O₃, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2019, vol. 21, no. 4, pp. 310–320.

DOI: 10.17587/nmst.21.310-320

Introduction

Necessity for creation of the magneto-resistive memory with a low energy consumption explains the researchers' interest to the memory with recording by means of the electric field applied to the electrosensitive dielectric layer (MERAM) in order to avoid noticeable Joule losses [1–4]. Alongside with the memory, in which the electrosensitive layer is coupled with the ferromagnetic layer, a part of the magnetic tunnel junction (MTJ), by the exchange interaction of spins [5–8], by the elastic interaction [9–17] or by the charge coupling [18–21], in the Refs [22, 23] a memory on the basis of the antiferromagnet-magnetoelectric (AF-MERAM) was offered.

If in the listed above types of memory the value of the bit is set by the direction of the magnetization vector of the ferromagnetic layer, then in AF-MERAM it is determined by the direction of the antiferromagnetic order parameter vector **L** of Cr₂O₃ compound [24]. In this case, the methods of recording and reading also significantly differ from the ones applied in other types of MERAM. The recording is based on the linear magne-

toelectric effect [25]. In the antiferromagnets, which have this effect, simultaneous application of constant electric and magnetic fields eliminates the degeneration of the energy of states, which are characterized by the opposite directions of **L**. The application of sufficiently strong fields leaves only one of the **L** directions steady.

In Ref. [22] the reading is based on the presence in an antiferromagnet of the surface magnetization, perpendicular to the uncompensated surface of the antiferromagnet [26]. The direction of magnetization is opposite for the two antiparallel directions of **L**. It is determined by means the anomalous Hall effect. Thereby, reading of the bit is carried out.

In this work we consider the restrictions for the size of a bit of such memory determined by the existence of a superparamagnetic threshold, and also the requirement to the quality of the interface between the Cr₂O₃ layer and the layer of the heavy metal serving for measurement of Hall resistance (Fig. 1, *a*). Besides, we will discuss opportunities for reading of the bit by means of MTJ and replacement of the constant magnetic field

with the exchange field created by the ferromagnet at the interface with the antiferromagnet.

1. Superparamagnetic limit

In absence of at least one of the two constant electric and magnetic fields the two states corresponding to the opposite directions of \mathbf{L} , have identical energy and are separated by a potential barrier. For a successful operation of the storage bit the value of this barrier should exceed $50 k_B T$ ($2.0 \cdot 10^{-19}$ J for $T = 290$ K), where k_B is the Boltzmann constant; and T is the temperature. In this case it is possible to neglect the probability of a spontaneous switching of the bit under the influence of the thermal fluctuations during the time of memory operation. This requirement determines the restriction for the minimal volume V_{\min} of the Cr_2O_3 layer.

For its assessment we will write down a magnetoelectric contribution to the volume density of the Gibbs thermodynamic potential Φ_{ME} . The general expression for Φ_{ME} is presented in [24]:

$$\begin{aligned} \Phi_{ME} = & \gamma_1[(L_x M_y + L_y M_x)P_x + (L_x M_x - L_y M_y)P_y] - \\ & - \gamma_2[(L_x P_x + L_y P_y)M_z - \gamma_3 L_z (M_x P_x + M_y P_y) - \\ & - \gamma_4 (L_x M_x + L_y M_y)P_z - \gamma_5 L_z M_z P_z, \end{aligned} \quad (1)$$

where $\gamma_i = \text{const}$, while L_i , M_i and P_i are projections of the vectors of the antiferromagnetism, magnetization and electric polarization to the axes of the orthogonal Cartesian system of coordinates. Axis z is the axis of the third order of the trigonal (rhombohedral) crystal lattice of Cr_2O_3 .

In a particular case, when the electric and magnetic fields are applied in parallel to axis z , one has

$$\Phi_{ME} = -\gamma_5 L_z M_z P_z. \quad (2)$$

Since Cr_2O_3 is neither a ferroelectric, nor a ferromagnet, that is, it does not possess either spontaneous electric polarization, or spontaneous magnetization, then

$$M_z = \chi_{zz} H_z, \quad (3)$$

$$P_z = \kappa_{zz} \varepsilon_0 E_z, \quad (4)$$

where χ_{zz} and κ_{zz} are components of the magnetic and dielectric susceptibility tensors; ε_0 is the SI constant, and H_z and E_z are the corresponding components of the intensities of the magnetic and electric fields.

By substituting Eqs. (3) and (4) in Eq. (2), one obtains

$$\Phi_{ME} = -\gamma_5 L_z \kappa_{zz} \chi_{zz} \varepsilon_0 E_z H_z \equiv -\alpha_{zz} E_z H_z, \quad (5)$$

where α_{zz} is the component of the direct linear magnetoelectric effect tensor. From expression (5) it is easy to see that at $E_z \neq 0$, $H_z \neq 0$ the two states differing by L_z sign become nonequivalent.

It is possible to estimate the value of the barrier between these states without carrying out calculation

from the first principles, on the basis of the experimental data. In the Ref. [22] the hysteresis loop of Hall resistance depending on the applied voltage is observed. It was demonstrated that in the magnetic field with intensity of $H_z = 5 \cdot 10^5$ A/m switching of the antiferromagnetic order parameter from one state to another occurred at the coercive electric voltage of $V = 1.5$ V applied to the 200-nm thick layer of Cr_2O_3 . This gives value of $E_z = 7.5$ MV/m and the product $E_z H_z = 3.8 \cdot 10^{12}$ W/m². Using for Cr_2O_3 the value of $\alpha_{zz} = 3.7$ ps/m [27, 28], we get assessment for the volume energy density of the potential barrier U between the states with the opposite values of L_z :

$$U = \alpha_{zz} E_z H_z = 14 \text{ J/m}^3. \quad (6)$$

At that, the minimal volume of the bit of Cr_2O_3 will be $V_{\min} = 50 k_B T / U = 1.4 \cdot 10^{-20} \text{ m}^3 = 1.4 \cdot 10^7 \text{ nm}^3$ (for example, $240 \times 240 \times 240 \text{ nm}$).

In the Refs [29, 30] change in the sign of the exchange bias of the hysteresis loop of the ferromagnetic layer of cobalt created by Cr_2O_3 layer was observed. This change was connected with variation of the sign of the antiferromagnetic order parameter in the electric and magnetic fields, followed by a reversal of the direction of the spins of the uncompensated surface atomic plane of Cr_2O_3 to the opposite one. In the Ref. [29] the switching was observed at $E_z H_z = 3.2 \cdot 10^{12}$ W/m², which differs from the value given above not more, than by 20 %.

In the Ref. [30] switching was observed at the temperature of 303 K. For $\mu_0 H_z = 154$ mT the intensity of the coercive electric field equaled to $E_z = 1.5$ MV/m, which gives the value of $E_z H_z = 1.8 \cdot 10^{11}$ W/m². Its reduction is due to the approach to the Neel temperature of Cr_2O_3 , $T_N = 310$ K [24]. We should keep in mind that reduction of U leads to the growth of V_{\min} .

In the Ref. [23] a micromagnetic modeling was carried out on the basis of equation of Landau — Lifshits — Gilbert, and the conclusion was drawn that in Cr_2O_3 sample with dimensions of $22.5 \times 22.5 \times 60 \text{ nm}$ ($V = 3,04 \cdot 10^{-23} \text{ m}^3$) the antiferromagnetic order parameter switches in the fields $E_z = 50$ MV/m, $H_z = 6 \text{ kOe} = 4.8 \cdot 10^5$ A/m ($E_z H_z = 2.4 \cdot 10^{13}$ W/m²), and at that, the barrier equals to $46 k_B T = 1.86 \cdot 10^{-19}$ J. For the volume density of the energy of the barrier we get $U = 46 k_B T / V = 6100 \text{ J/m}^3$ which is 440 times higher than the experimental value of the Ref. [22]. For the value of constant α_{zz} we get $\alpha_{zz} = U / (E_z H_z) = 2.5 \cdot 10^{-10}$ s/m, which is almost 70 times higher than the experimental value for Cr_2O_3 . Thus, it is possible to draw a conclusion that calculation of the Ref. [23] does not agree with the experimental data.

High value of V_{\min} limits the opportunities for scaling of AF-MERAM on the basis of Cr_2O_3 on the nanometer range of sizes. The use of the magnetoelectrics with higher values of T_N and U will also demand higher

values of the intensity of the electric field and, therefore, the better electric strength of the material.

2. Interface roughness

Considerable linear sizes of the bit set additional tasks before the technologists — developers of AF-MRAM. The matter is that existence of the atomic steps on the uncompensated surface (0001) of Cr₂O₃ (the compensated surface is unsuitable for reading by means of anomalous Hall effect) can lead to the fact that the chrome ions lying in the surface of the atomic plane on different sides of the step edge will belong to different magnetic sublattices of the antiferromagnet (Fig. 2). Therefore, the surface magnetization will have opposite directions on different sides of the step edge [26], which will lead to its effective compensation [31].

If the magnetoelectric — heavy metal interface is broken by the atomic steps into the regions with the opposite direction of the surface magnetization, then during reading by means of anomalous Hall effect there will be an averaging of the signal. Therefore, it is necessary to reach an atomic smoothness of the interface at a scale of several hundreds of nanometers, which is a difficult task.

It should be pointed out that according to the Ref. [30] such steps do not arise on the surface (0001) of Cr₂O₃. The final solution to the matter requires an additional information concerning the structure and concentration of the atomic steps on the Cr₂O₃ / heavy metal interface.

3. Reading by means of MTJ

In the Ref. [23] the authors proposed a method of reading by means of MTJ. For this reading it is necessary that the opposite direction of magnetization of the "free" ferromagnetic layer, which is a part of MTJ (see Fig. 1, *b*), corresponds to states "0" and "1" of the bit. It should also switch over at the time of recording of the bit together with the direction of the antiferromagnetism vector of the Cr₂O₃ layer. The coupling between these two layers is caused by the exchange interaction of the spins of the boundary atomic plane of Cr₂O₃ with the spins of the atoms of the interface atomic plane of the ferromagnetic layer. This interaction leads to an exchange shift of the hysteresis loop of the ferromagnetic layer. The opposite directions of the antiferromagnetism vector correspond to the opposite values of the exchange-bias field H_{EB} .

In order for a change of H_{EB} sign to lead to a 180° rotation of the magnetization vector of the free ferromagnetic layer, it is necessary and sufficient that H_{EB} satisfies the following inequality

$$H_{EB} > H_z + H_c, \quad (7)$$

where H_c is the coercive field intensity of the ferromagnetic layer (Fig. 3).

In the Ref. [29] for the layer of cobalt, which was a part of the system of Cr₂O₃ (250 nm) / Pt (1 nm) / Co (1 nm), the value of $H_{EB} = 160$ Oe was obtained, which was more than by an order less than the constant magnetic field $H_z = 6$ KOe. Such a low value of H_{EB} can be connected with the existence of the atomic steps on the interface of the layers leading to averaging of the exchange shift due to reasons discussed in section 2. For reading by means of MTJ in the constant magnetic field it is necessary to select such a material for the free ferromagnetic layer and to reach such a quality of the interface, which could ensure the value of the exchange shift of its hysteresis loop on the surface of Cr₂O₃ layer of about 1 T.

4. Replacement of the external magnetic field with the exchange one

An alternative version of the memory without the use of the constant magnetic field was offered in the Ref. [23]. It was planned to replace the external magnetic field with the exchange field H_e of a rigid ferromagnet (permanent magnet) located along the perimeter of the lateral surface of the Cr₂O₃ layer of (see Fig. 1, *c*). At that, the surface of Cr₂O₃ should be compensated, because otherwise, in case of an uncompensated surface, a strong Heisenberg interaction of the spins of one of the sublattices of the chromium ions with ferromagnetic spins, surpassing considerably the magnetoelectric interaction, would stabilize one of the values of L_z , which corresponds to the minimum of the exchange energy, and reorientation of L_z would become impossible.

It should be noted that the exchange field has a short-range character, it is possible to consider that it works in the area by volume equal to $4bha$, where b is the interatomic distance; h is the height of the Cr₂O₃ layer selected in the form of a rectangular parallelepiped with the square basis, a is the side of the basis. In a strong exchange field a spin-flop orientation will appear on the compensated surface of Cr₂O₃, i.e. there will be a capsizing of its antiferromagnetic sublattices, and vector \mathbf{L} will become oriented perpendicularly to the magnetization vector of the ferromagnetic [32]. As is shown in the Ref. [33], in the presence of the parallel easy axes of anisotropy in the layers, as it takes place in the case under consideration, an exchange spiral appears near the interface of the layers (Fig. 4).

In the depth of the layers, the vector \mathbf{L} and the magnetization vector of the ferromagnet \mathbf{M}_f are collinear to the easy axis z . Angle φ , which the magnetization vector of the boundary atomic plane of the ferromagnetic forms with the light axis, depends on the correlation be-

tween the surface energies of the Bloch domain walls in the layers w_{af} and w_f :

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{w_{af}}{w_f}. \quad (8)$$

In case $w_{af} \gg w_f$, $\varphi \approx \pi/2$ and practically all the spiral is located in the ferromagnetic layer. If the ferromagnet is hard, as it was envisaged in the Ref. [23], then $w_{af} \ll w_f$, $\varphi = 0$ and practically all the exchange spiral is located in the Cr_2O_3 layer.

In the case under consideration, when axis x is perpendicular to the interface of the layers, one has

$$\Phi_{ME} = -(\gamma_4 L_y M_y + \gamma_5 L_z M_z) P_z. \quad (9)$$

In case of a hard ferromagnet $L_z(0) \approx 0$ and $M_y(0) \approx 0$ on the Cr_2O_3 surface. Therefore, the magnetoelectric interaction is also equal to zero. The magnetic moment induced in the antiferromagnet by the exchange field falls down at the atomic distances [34], much smaller than the size of the area of existence of the exchange spiral, which is roughly equal to the thickness of the Bloch domain wall in this material [33]. Therefore, in the first approximation, in that Cr_2O_3 area, in which $M_z \neq 0$, the values of L_z and M_y are also equal to zero. Thus, the use of a hard ferromagnet is inexpedient.

At an arbitrary value of φ near the surface of Cr_2O_3 (Fig. 5)

$$\Phi_{ME} = \frac{1}{2}(\gamma_4 - \gamma_5) L M P_z \sin 2\varphi P_z. \quad (10)$$

From here we get the first recommendation: the material of the ferromagnetic should be selected so that $w_{af} \approx w_f$. Then, $\sin 2\varphi \approx 1$ and action of the exchange field will be the most effective.

Now let us find the optimal value of this field. Since the product of LM is different from zero only in several atomic planes near the Cr_2O_3 surface, during assessment of its value it is possible to neglect the twisting of the exchange spiral and confine to the exchange approximation [34]. Let us number the atomic Cr_2O_3 planes, parallel to the interface, by index i , beginning from the surface. For simplicity reasons, we will confine to the two- but not four-sublattice approach. Let angle θ_i be the tilt angle of the antiferromagnetic sublattices in i atomic plane (the angle of θ_1 is depicted in Fig. 5). Let us assume the module of magnetizations of the Cr_2O_3 sublattices as an invariable and equal to \tilde{M} . Then the modules L_i and M_i of antiferromagnetism and magnetization vectors belonging to i -th atomic plane, are equal $L_j = 2\tilde{M}\cos\theta_j$, $M_j = 2\tilde{M}\sin\theta_j$. The surface contribution to Φ_{ME} is proportional to the value of $\sum_i L_i M_i = 2\tilde{M}^2 \sum_i \sin 2\theta_i$. Owing to a fast convergence of this sum, for the assessment we will limit our-

selves by the first summand. The maximum of Φ_{ME} is reached at $\theta_1 = \pi/4$. Value of θ_1 is defined by the competition of energy $W_{f,af}$ of the interlayer exchange interaction and energy W_{af} of the exchange interaction in Cr_2O_3 . In approximation of the small angles in the Ref. [34] the following analytical expression was obtained for θ_1 :

$$\theta_1 = \xi \frac{W_{f,af}}{W_{af}}. \quad (11)$$

Factor $\xi \approx 1$ depends on the type of the layers crystal lattices.

Thus, it is possible to formulate the second requirement to selection of the ferromagnetic layer: it should ensure the optimal value of the tilt angle of the sublattices on the Cr_2O_3 surface.

Let us find restrictions concerning the sizes of the storage bit, which are due to existence of a superparamagnetic threshold. In case of the use of magnetic field $L_z = 2\tilde{M}$; $M_z = \chi_{zz} H_z$; $L_z M_z = 2\tilde{M}\chi_{zz} H_z$, and in the case under consideration the optimal value is $L_z M_z = \tilde{M}^2$. Therefore, the new value of the minimal volume \tilde{V}_{\min} is equal to

$$\tilde{V}_{\min} = V_{\min} \frac{2\chi_{zz} H_z}{\tilde{M}}. \quad (12)$$

Using for χ_{zz} the value $1.2 \cdot 10^{-4}$ (SGS) [29], the value of the magnetic moment of an ion of chrome of 2.48 Bohr magneton [35] and also the value of density of Cr_2O_3 5.22 g/cm³, we find the value $\tilde{M} = 4.76 \cdot 10^5$ A/m and $\tilde{V}_{\min} = 2.5 \cdot 10^{-3} V_{\min} = 3.6 \cdot 10^{-23}$ m³ = $3.6 \cdot 10^4$ nm³. Assuming that $b = 0.5$ нм, we obtain $(ah)_{\min} = 2 \cdot 10^4$ nm².

Thus, even in the optimal case, when using the exchange field, the linear sizes of the bit exceed 100 nm.

Conclusion

1. With account of the superparamagnetic threshold, an estimate is obtained for the minimum bit volume of the AF-MRAM on the basis of Cr_2O_3 : $V_{\min} = 1.4 \cdot 10^7$ nm³.

2. Requirements are formulated for the magnitude of the exchange bias which makes it possible to use the magnetic tunnel junction for reading in a constant magnetic field.

3. It is shown that the optimum conditions for replacing the external magnetic field by the ferromagnetic exchange field correspond to such physical parameters of the ferromagnet that provide the values of the angle between the antiferromagnetism vector and the easy axis and the tilt angle of the sublattices close to $\pi/4$ on the Cr_2O_3 surface.

Acknowledgment

The research was supported by the Russian Science Foundation, project 17-12-01435.

References

1. **Thomas R., Scott J. S., Bose D. N., Katiyar R. S.** Multiferroic thin-film integration onto semiconductor devices, *J. Phys.: Cond. Matt.*, 2010, vol. 22, 423201, 17 p.
2. **Ma J., Hu J., Li Z., and Nan C.-W.** Recent Progress in Multiferroic Magnetoelectric Composites: from Bulk to Thin Films, *Adv. Matter.*, 2011, vol. 23, no. 9, pp. 1062–1087.
3. **Morosov A. I.** Pereklyuchenie namagnichennosti ferromagnetika ehlektricheskim polem, *Physics of the Solid State*. 2014. vol. 56, no. 5. pp. 865–872 (in Russian).
4. **Hu J.-M., Chen L.-Q., and Nan C.-W.** Multiferroic heterostructures integrating ferroelectric and magnetic materials, *Advanced Materials*, 2016, vol. 28, no 1. pp. 15–39.
5. **Morosov A. I., Sigov A. S.** Peremagnichivanie ehlektricheskim polem v dvuhslojnoj strukture ferromagnetik—magnitoelektrik, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2012, no. 10, pp. 10–14 (in Russian).
6. **Morosov A. I., Sigov A. S.** Magneto-resistive Memory with Recording by Electric Field: Is the Weak Ferromagnetism Necessary?, *J. Magn. Magn. Mater.*, 2015. vol. 383, pp. 242–245.
7. **Vinokurov D. L., Morosov A. I.** Exchange Coupling of a BiFeO₃ Multiferroic Nanolayer with a Co_{0.9}Fe_{0.1} Ferromagnetic Nanolayer, *Physics of the Solid State*, 2015, vol. 57, no. 9, pp. 1781–1786.
8. **Berzin A. A., Vinokurov D. L., Morosov A. I.** Evolution of the Antiferromagnetism Vector of a Multiferroic BiFeO₃ during Switching Its Ferroelectric Polarization, *Physics of the Solid State*, 2016, vol. 58, no. 11, pp. 2320–2324.
9. **Pertsev N. A.** Giant magneto-electric effect via strain-induced spin reorientation transitions in ferromagnetic Films, *Phys. Rev. B.*, 2008, vol. 78, 212102 (4 p.).
10. **Hu J.-M., Nan C. W.** Electric-field-induced magnetic easy-axis reorientation in ferromagnetic/ferroelectric layered heterostructures, *Phys. Rev. B.*, 2009, vol. 80, 224416 (11 p.).
11. **Pertsev N. A., Viaud G., Dkhil B.** Polarization-controlled spin reorientation and resistive switching in ferromagnet-ferroelectric nanostructures and tunnel junctions, *Phys. Rev. B*, 2014, vol. 90, 024426 (8 p.).
12. **Wu T., Bur A., Wong K.** et al. Electrical control of reversible and permanent magnetization reorientation for magnetoelectric memory devices, *Appl. Phys. Lett.*, 2011, vol. 98, 262504 (3 p.).
13. **Buzzi M., Chopdekar R. V., Hockel J. L.** et al. Single domain spin manipulation by electric fields in strain coupled artificial multiferroic nanostructures, *Phys. Rev. Lett.* 2013, vol. 111, 027204 (5 pp.).
14. **Zhang S., Zhao Y., Xiao X.** et al. Giant electrical modulation of magnetization in Co₄₀Fe₄₀B₂₀/Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_{0.7}Ti_{0.3}O₃ (011) heterostructure, *Sci. Rep.*, 2014, vol. 4, 3727 (7 p.).
15. **Wu T., Bur A., Zhao P.** et al. Giant electric-field-induced reversible and permanent magnetization reorientation on magnetoelectric Ni/(011)[Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃]_(1-x)–[PbTiO₃]_x heterostructure, *Appl. Phys. Lett.*, 2011, vol. 98, 012504 (3 p.).
16. **Morosov A. I., Sigov A. S.** "Long leg" magnetoelectric memory, *J. Appl. Phys.*, 2014, vol. 115, 223909 (4 p.).
17. **Morosov A. I.** Magniterezistivnaya pamyat' s zapis'yu ehlektricheskim polem na osnove uprugogo vzaimodejstviya sloev *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 12, pp. 744–751 (in Russian).
18. **Duan C.-G., Velev J. P., Sabirianov R. F.** et al. Surface Magnetoelectric Effect in Ferromagnetic Metal Films, *Phys. Rev. Lett.*, 2008, vol. 101, 137201 (4 pp.).
19. **Cai T., Ju S., Lee J.** et al. Magnetoelectric coupling and electric control of magnetization in ferromagnet/ferroelectric/normal-metal superlattices, *Phys. Rev. B.*, 2009, vol. 80, 140415 (4 p.).
20. **Nan T., Zhou Z., Liu M.** et al. Quantification of strain and charge co-mediated magnetoelectric coupling on ultra-thin Permalloy/PMN-PT interface, *Sci. Rep.*, 2014, vol. 4, 3688 (6 p.).
21. **Cherifi R. O., Ivanovskaya V., Phillips L. C.** et al. Electric-field control of magnetic order above room temperature, *Nature Materials*, 2014, vol. 13, no. 4, pp. 345–351.
22. **Kosub T., Kopte M., Huhne R.** et al. Purely antiferromagnetic magnetoelectric random access memory, *Nature communications*, 2017, vol. 8, 13985 (7 p.).
23. **Ahmed R., Victora R. H.** A fully electric field driven scalable magnetoelectric switching element, *Appl. Phys. Lett.*, 2018, vol. 112, 182401 (4 p.).
24. **Turov E. A., Kolchanov A. V., Men'shenin V. V.** et al. Simmetriya i fizicheskie svoystva antiferromagnetikov, Moscow, 2001. 560 p. (in Russian).
25. **Astrov D. N.** Magnetoelectric effect in chromium oxide, *Soviet Phys. JETP.*, 1961. vol. 13, no. 4, pp. 729–733.
26. **Andreev A. F.** Macroscopic magnetic fields of antiferromagnets, *JETP Letters.*, 1996. vol. 63, no. 9, pp. 758–762.
27. **Fiebig M.** Revival of the magnetoelectric effect, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2005, vol. 38, no. 8, pp. R123–R152.
28. **Rivera J.-P.** On definitions, units, measurements, tensor forms of the linear magnetoelectric effect and on a new dynamic method applied to Cr–Cl boracites, *Ferroelectrics*, 1994, vol. 161, pp. 165–180.
29. **Ashida T., Oida M., Shimomura N.** et al. Observation of magnetoelectric effect in Cr₂O₃/Pt/Co thin film system, *Appl. Phys. Lett.*, 2014, vol. 104, 152409 (3 p.).
30. **He X., Wang Y., Wu N.** et al. Robust isothermal electric control of exchange bias at room temperature, *Nature Mater.*, 2010, vol. 9, pp. 579–585.
31. **Dho J., Blamire M. G., Chi E. O.** Correlation of the exchange interaction in Ni₈₁Fe₁₉/Cr₂O₃ bilayers with the antiferromagnetic spin configuration, *Phys. Rev. B.*, 2005, vol. 72, 224421 (7 p.).
32. **Koon N. C.** Calculations of exchange bias in thin films with ferromagnetic/antiferromagnetic interfaces, *Phys. Rev. Lett.*, 1997, vol. 78, no. 25. pp. 4865–4868.
33. **Morosov A. I., Rynkov D. O.** Magnetic structure of the interface between ferromagnet and antiferromagnet with parallel anisotropy axes, *Physics of the Solid State*, 2007, vol. 49, no. 10, pp. 1940–1943.
34. **Morosov A. I.** Magnetic structure of a compensated ferromagnet – antiferromagnet interface, *Physics of the Solid State*, 2003, vol. 45, no. 10, pp. 1940–1943.
35. **Brown P. J., Forsyth J. B., Lelièvre-Berna E., Tasset F.** Determination of the magnetization distribution in Cr₂O₃ using spherical neutron polarimetry, *J. Phys.: Condens. Matter.*, 2002, vol. 14, no. 8, pp. 1957–1966.

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромьинский 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 20.03.2019. Подписано в печать 24.04.2019. Формат 60×88 1/8. Заказ МС519. Цена договорная
Оригинал-макет ООО «Авансед солюшнз». Отпечатано в ООО «Авансед солюшнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Рисунки к статье И. Е. Лысенко, А. В. Ткаченко
**«АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИТЯЖЕНИЯ
 ИНТЕГРАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО МЭМС-ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ
 С ЕМКОСТНЫМ ПРИНЦИПОМ КОММУТАЦИИ В КОНФИГУРАЦИИ
 С КОПЛАНАРНОЙ ЛИНИЕЙ ПЕРЕДАЧИ»**

I. E. Lysenko, A. V. Tkachenko

**«ANALYTICAL CALCULATION OF THE OFFSET VOLTAGE
 OF THE INTEGRATED ELECTROSTATIC MEMS SWITCH WITH
 THE CAPACITIVE SWITCHING PRINCIPLE IN CONFIGURATION
 WITH A COPLANAR TRANSMISSION LINE»**

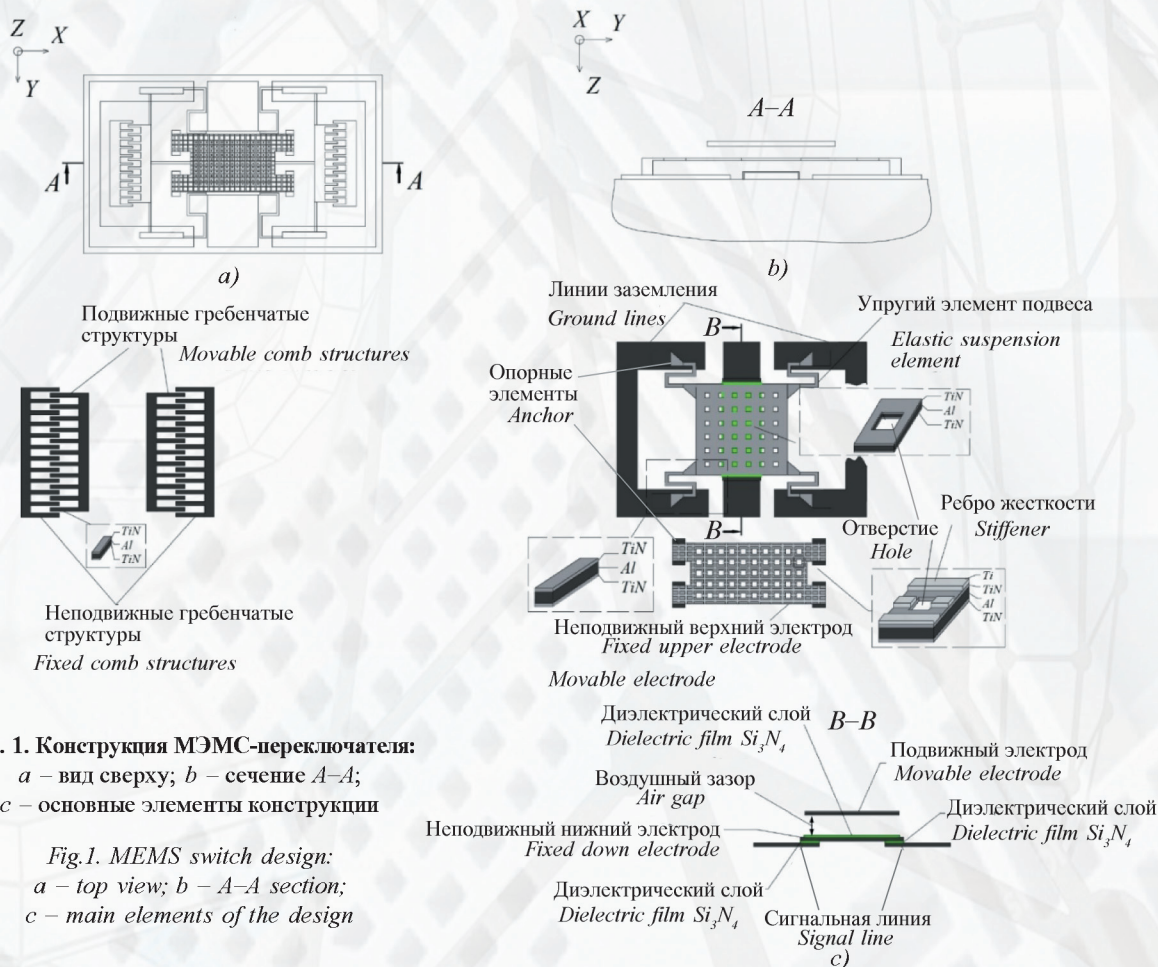
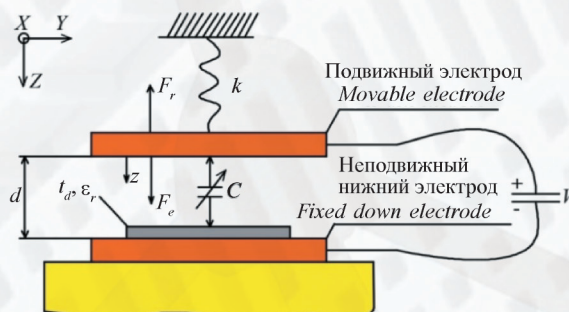


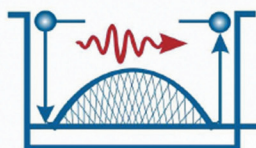
Рис. 1. Конструкция МЭМС-переключателя:
 a – вид сверху; b – сечение A-A;
 c – основные элементы конструкции

Fig.1. MEMS switch design:
 a – top view; b – A-A section;
 c – main elements of the design

**Рис. 2. Одномерная модель
 электростатического МЭМС-переключателя**

Fig.2. One-dimensional model of the
 electrostatic MEMS switch





XIV Российская конференция по физике полупроводников

Новосибирск, 9–13 сентября 2019 г.

Конференция посвящена фундаментальным проблемам физики полупроводников

Основные разделы программы

- **Объемные полупроводники:** электрические и оптические свойства, релаксация носителей заряда, сверхбыстрые явления, экситоны, фононы, фазовые переходы, упорядочение.
- **Поверхность, пленки, слои:** эпитаксия, атомная и электронная структура поверхности, адсорбция и поверхностные реакции, процессы формирования (самоорганизации) нанокластеров, СТМ и АСМ, оптическая микроскопия ближнего поля.
- **Гетероструктуры, сверхрешетки, одномерные системы:** структурные и оптические свойства, электронный транспорт.
- **Двумерные системы:** структурные, электронные, магнитные и оптические свойства, туннелирование, локализация, фононы, плазмоны, квантовый эффект Холла, корреляционные эффекты.
- **Нульмерные системы (квантовые точки, нанокристаллы):** энергетический спектр, оптические свойства, туннельный транспорт.
- **Спиновые явления, спинтроника, наномagnetизм.**
- **Примеси и дефекты (объемные полупроводники и квантово-размерные структуры):** примеси с мелкими и глубокими уровнями, магнитные примеси, структурные дефекты, неупорядоченные полупроводники.
- **Высокочастотные явления в полупроводниках (СВЧ и терагерцовый диапазон).**
- **Углеродные и графеноподобные наноматериалы, монослои дихалькогенидов переходных металлов, перовскиты, органические полупроводники, молекулярные системы.**
- **Фотонные кристаллы, микрорезонаторы и метаматериалы. Нанопотоника.**
- **Полупроводниковые приборы и устройства:** технология, методы исследования, наноприборы.
- **Нано- и оптомеханика.**
- **Топологические изоляторы и полуметаллы Вейля.**

Подробности на сайте конференции: <https://www.isp.nsc.ru/semicond2019/>