НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 6(155) ✦ 2013

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Журнал выпускается при научно-методическом руководстве Отделения нанотехнологий и информационных технологий Российской академии наук

Журнал включен в перечень научных и научно-технических изданий ВАК России и в систему Российского индекса научного цитирования

Издается с 1999 г.

Главный редактор
Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора
Лучинин В. В.

Редакционный совет:
Аристов В. В.
Асеев А. Л.
Волчихин В. И.
Гапонов С. В.
Захаревич В. Г.
Каляев И. А.
Квардаков В. В.
Климов Д. М.
Ковальчук М. В.
Нарайкин О. С.
Никитов С. А.
Рыжий В. И. (Япония)
Сауров А. Н.
Серебряников С. В.
Сигов А. С.
Стриханов М. Н.
Чаплыгин Ю. А.
Шахнов В. А.
Шевченко В. Я.

Редакционная коллегия:
Абрамов И. И. (Республика Беларусь)
Андриевский Р. А.
Антонов Б. И.
Арсентьева И. П.
Астахов М. В.
Быков В. А.
Горнев Е. С.
Градецкий В. Г.
Гурович Б. А.
Кальнов В. А.
Карякин А. А.
Колобов Ю. Р.
Кузин А. Ю.
Мокров Е. А.
Панич А. Е.
Панфилов Ю. В.
Петросянц К. О.
Петрунин В. Ф.
Пожела К. (Литва)
Путилов А. В.
Пятышев Е. Н.
Сухопаров А. И.
Телец В. А.
Тимошенков С. П.
Тодуа П. А.
Шубарев В. А.
Шур М. (США)

Отв. секретарь
Лысенко А. В.

Редакция:
Григорин-Рябова Е. В.
Чугунова А. В.

Учредитель:
Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Челпанов И. Б., Кочетков А. В. Многоцелевые алгоритмы оценки составляющих сигналов микромеханических датчиков угловой скорости и акселерометров 2

Землянников Н. С., Данилова Н. Л., Панков В. В., Суханов В. С., Гаврилов Р. О., Михайлов Ю. А. Конструкция чувствительных элементов на малые давления с повышенной перегрузочной способностью 8

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Заблоцкий А. В., Кузин А. Ю., Михеев Н. Н., Никифорова Н. А., Степович М. А., Тодуа П. А., Филиппов М. Н. Модель квадратичной рекомбинации неосновных носителей заряда в прямозонных полупроводниках для катодолюминесцентной идентификации электрофизических параметров 10

Батурин А. С., Булах К. В., Григал И. П., Егоров К. В., Заблоцкий А. В., Маркеев А. М., Лебединский Ю. Ю., Горнев Е. С., Орлов О. М., Чуприк А. А. Эффект резистивного переключения в оксидных пленках $Hf_xAl_{1-x}O_y$ с переменным составом, выращенных методом атомно-слоевого осаждения 13

Глухова О. Е., Коссович Е. Л. Исследование распространения краевых волн в многослойных графеновых пластинах в зависимости от вида укладки слоев . . . 19

Аверин И. А., Губич И. А. Исследование процессов рекристаллизации алюминиевой фольги — стадии получения пористого оксида алюминия. 26

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Мальцев П. П., Гнатюк Д. Л., Фёдоров Ю. В., Зуев А. В., Галиев Р. Р., Побойкина Н. В. Исследование малосигнальных и шумовых характеристик метаморфных транзисторов для монолитных интегральных схем в крайневысокочастотном диапазоне 29

Бобринецкий И. И., Бессонова А. В., Комаров И. А., Маловичко А. М., Назаркин М. Ю., Неволин В. К., Рымаренко В. С, Царик К. А. Исследование сенсорных свойств перколированных сеток из углеродных нанотрубок и нановолокон ZnO 32

Кернбах С. Исследование проникающей способности светодиодного и лазерного излучения. Часть 1 38

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

Прокофьев И. В., Суханов В. С. Комплексирование магнитоинерциальных и спутниковых систем навигации для систем мониторинга параметров движения транспорта 47

БИОЭЛЕКТРОНИКА

Абрамов И. И. Мозг — объект органической гибридной наноэлектроники, или взгляд со стороны. Часть IV 49

Contents 55

Аннотации на русском и английском языках с 1999 г. по настоящее время находятся в свободном доступе на сайте журнала (http://novtex.ru/nmst/) и научной электронной библиотеки (http://elibrary.ru). Электронные версии полнотекстовых статей расположены на сайте журнала: с 1999 по 2011 г. в разделе "АРХИВ".

ПОДПИСКА:
по каталогу Роспечати (индекс 79493);
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

© Издательство "Новые технологии", "Нано- и микросистемная техника", 2013

Моделирование и конструирование МНСТ

УДК 621.9

И. Б. Челпанов, д-р техн. наук, проф.,
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
А. В. Кочетков, д-р техн. наук, проф.,
e-mail:soni.81@mail.ru,
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, ООО "Научно-исследовательский центр технического регулирования"

МНОГОЦЕЛЕВЫЕ АЛГОРИТМЫ ОЦЕНКИ СОСТАВЛЯЮЩИХ СИГНАЛОВ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ И АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Поступила в редакцию 19.09.2012

Рассматриваются вопросы планирования, организации и проведения испытаний микромеханических датчиков и приборов (MEMS), в первую очередь микромеханических гироскопов (ММГ), входящих в состав навигационных систем и комплексов подвижных объектов. Такие датчики именуются по принципу действия микромеханическими, микроэлектронно-механическими или микроэлектромеханическими.

Ключевые слова: *микромеханические приборы, испытания, средства измерения, датчики угловой скорости, акселерометры*

По результатам анализа и сопоставления данных, относящихся к различным гироскопам, выполняющим функции датчиков угловой скорости (ДУС), могут быть сделаны следующие выводы [1]:

- в перечнях паспортных данных на разные гироскопы имеются значительные различия, объемы перечней характеристик для разных приборов различаются в несколько раз, тем не менее, во всех случаях метрологические (точностные) характеристики составляют значительную часть; для более точных гироскопов обычно данные более подробные;
- порядок перечисления показателей для различных приборов сильно различается, иногда первые важнейшие показатели (диапазон измерения, масштабный коэффициент) приводятся в конце перечня;
- не всегда приводятся данные о важнейшем показателе — о масштабном коэффициенте, он иногда называется иначе, обычно отсутствуют сведения о диапазоне его изменения по экземплярам;
- у некоторых приборов имеются модификации, различающиеся типом выходных сигналов (аналоговые или цифровые), по ним данные обычно приводятся раздельно;
- в качестве динамической характеристики чаще всего приводится ширина полосы пропускания по частоте, что, по-видимому, объясняется простотой проведения необходимых для этого испытаний на вибростенде (регистрируется частота, на которой амплитуда выходного сигнала быстро спадает), но не приводятся никакие сведения о диапазонах относительно малых динамических погрешностей и о фазочастотных характеристиках;
- во всех случаях обращается внимание на случайные составляющие погрешностей, как правило, приводится уровень спектральной плотности (по-видимому, средний в полосе пропускания);
- почти во всех случаях приводятся сведения о постоянной составляющей погрешности, которая обычно отождествляется со смещением нуля, но лишь иногда приводятся необходимые пояснения (начальное смещение нуля, разброс по экземплярам, его изменения от пуска к пуску и пр.);
- в немногих случаях оценивается влияние ориентации прибора относительно вертикали, действия постоянных перегрузок, вибрации и пр.;
- по отношению к испытаниям на вибрации и удары, если эти сведения приводятся, ограничиваются приведением параметров этих воздействий, при которых гарантированно сохраняется работоспособность;
- в тех пунктах, в которых приводятся сведения о виброустойчивости, часто имеется в виду задание при испытаниях случайного закона виброускорений, для чего необходимы специальные стенды; кроме того нужно иметь в виду, что информация о свойствах испытуемого прибора от проведения таких испытаний гораздо труднее содержательно интерпретируется;
- почти везде приводятся какие-то сведения о влиянии изменений температуры, но в одних случаях это просто диапазон допустимых изменений температуры, а в других случаях — коэффициент влияния, характеризующий изменение показателя точности при изменениях температуры во всем диапазоне;
- нигде не приводятся сведения о резонансных эффектах, нарушающих нормальный режим работы;

нигде не фигурирует такой показатель, как порог чувствительности по угловой скорости;

- имеются значительные различия в используемой терминологии, вследствие чего не всегда ясно применительно к разным приборам, идет ли речь об одних и тех же показателях, но поразному названных, или о различных; некоторые термины просто неправильны (например, "нелинейность масштабного коэффициента").

Анализ приведенных и многих других сведений о серийно выпускаемых датчиках показывает, что номенклатура паспортных данных микрометрических гироскопов (ММГ), а тем более наименования показателей различных фирм-производителей сильно различаются, обязательным оказывается только диапазон измерений, некоторые из показателей никогда не присутствуют, но добавляются новые. В отношении некоторых показателей имеются серьезные сомнения относительно того, проверялись ли они при испытаниях; это относится к нелинейности: странно, что самые разные организации указывают одно и то же значение 0,1 %, экспериментально подтвердить которое достаточно сложно. Есть ряд принципиальных трудностей, например, неясно как отличить "белый шум" (это абстракция) от коррелированного. Однако в отношении ММГ приходится сталкиваться с такими факторами, которые совершенно нетипичны для метрологии: индивидуальные различия метрологических характеристик экземпляров могут быть велики (порядка 10 % и более). Это, как правило, никак не отражается в паспортных данных.

Просмотр паспортных данных по микромеханическим приборам, выпускаемых ведущими фирмами, обнаруживает значительный разнобой и полное пренебрежение положениями стандарта IEEE, который, конечно, не является обязательным на международном уровне, но он уважаем и известен. Иногда вообще отсутствуют данные о погрешностях (для некоторых прикладных задач они действительно могут быть несущественны), но вместе с тем, иногда приводятся данные о дополнительных погрешностях, обусловленных ориентацией, изменениями температуры, вариациями постоянных составляющих от включения к включению (они относят к категории "чувствительность", которая в отечественных метрологических стандартах понимается совершенно иначе — как свойство реагировать на малые изменения измеряемой величины). В более или менее полном виде экспериментальное определение такого большого числа показателей, как в общей интегральной сводке по всем паспортным данным, возможно только при серьезных исследовательских испытаниях. К сожалению, стандарт IEEE и другие нормативные документы не ранжируют показатели по значимости хотя бы для определенных приложений, так что неясно, какие показатели следует определять в первую очередь при ограниченности временных ресурсов. В большинстве случаев все характеристики определяются в результате самостоятельных серий испытаний на специализированных стендах при использовании специфических алгоритмов преобразования получаемых данных.

Несмотря на длительную историю проведения испытаний и обработки получаемых данных, до сих пор нет обоснованных, общепринятых, установившихся представлений о соотношении роли систематических и случайных погрешностей различных метрологических характеристик, о показателях нелинейности статических характеристик, о степени стабильности систематических погрешностей, об изменчивости по экземплярам и от пуска к пуску и т. д. Во всех случаях необходимо определиться относительно фактора случайности на уровне таких общих представлений, как неповторяемость, изменчивость (и тогда задаются предельные значения) или в строгом смысле (как характеризующаяся вероятностями). В принципе случайными (для различных экземпляров или от пуска к пуску) следовало бы считать все метрологические характеристики. Но без достаточных оснований принято считать случайными (для различных экземпляров приборов и/или от пуска к пуску) лишь некоторые из них; в таблице обычно предполагаемый характер основных показателей помечен знаком +.

В соответствии с традицией различные показатели точности считаются независимыми. Если в результате исследований будет установлено, что между различными показателями существуют явно выраженные качественные и количественные зависимости, то их можно было бы использовать при контроле образцов датчиков (определяя в первую очередь наиболее информативные показатели или те, для определения которых затраты минимальны).

При серьезных исследовательских испытаниях следовало бы проверять, в какой степени соответствуют действительности предположения о неслучайности некоторых показателей и насколько они в действительности изменчивы. Изменчивость по экземплярам микромеханических приборов различных показателей, отклонений от средних или номинальных значений может быть в пределах ±1 %, ±10 %, ±50 % или даже в несколько раз. Значительные различия характерны именно для современных микромеханических приборов, ранее, для "старых" (например, стрелочных) средств измерений подобная изменчи-

Метрологическая характеристика	Неслучайная	Случайная
Смещение нуля		+
Дрейф нуля во времени		+
Шум		+
Нелинейность	+	
Порог чувствительности	+	
Динамическая характеристика	+	

вость параметров (например, масштабных коэффициентов или градуированных шкал) была немыслима.

При обнаружении значимых различий метрологических характеристик по экземплярам могут быть сделаны разные выводы, например, это необходимость сортировки по группам, индивидуальная градуировка с внесением данных в паспорт прибора, калибровка в составе системы или комплекса с запоминанием и последующим введением корректирующих поправок и т. п. В рассматриваемых задачах традиционным является принцип многоканальности, при использовании которого в каждом канале вырабатываются сведения об одной составляющей. Подобно вариации Аллана, можно получить сведения о различных составляющих сигнала или в одном, или в параллельных каналах при использовании разных алгоритмов, причем при общем принципе построения их свойства могут значительно различаться. Предполагается, что реализации представлены в виде непрерывных процессов, функций времени $x(t)$; также предполагается, что преобразование может осуществляться на текущем интервале $(0, t)$.

Обзор существующих методов преобразования и определения характеристик и параметров одного сигнала $x(t)$ как функции времени показал, что в одном канале (единственном или одном из работающих параллельно) разные алгоритмы могут быть представлены в обобщенном виде, в единообразной форме следующим образом в виде функционала общего вида:

$$F\{x(t)\} = N(t)R_2\left\{\int_0^t R_1[W(t, \tau)x(\tau)]d\tau\right\}. \qquad (1)$$

Здесь $N(t)$ — нормирующий множитель, зависящий от времени (обычно это степенная функция $N(t) = at^k$ для нестационарных преобразований с растущим временем памяти или $N(t) = a(t - T)^k$ для скользящего стационарного преобразования с постоянным временем памяти T); $W(t, \tau)$ — ядро или весовая функция; a — числовой множитель (может быть $a = 1$); R_1 и R_2 — символы нелинейных преобразований, обычно степенных (часто они бывают обратными, например, R_1 — возведение в квадрат, а R_2 — извлечение квадратного корня). Если указанные функции R_1 и R_2 являются взаимно обратными, то преобразование в целом является линейным относительно масштабного коэффициента. Простейшим вариантом является использование функции модуля R_1 (определения абсолютного значения), тогда нет необходимости в преобразовании R_2. Одной из целей использования таких функций является устранение знака, т. е. приведение к положительным значениям, что необходимо для правильного отражения свойств параметров разброса знакопеременных составляющих. Но для некоторых алгоритмов нелинейные преобразования не проводятся, и тогда преобразование в целом является линейным. Часто для наглядности представления зависимости строятся при дополнительных масштабных преобразованиях; в соответствии с традицией наиболее распространенными являются логарифмическая или полулогарифмическая сетки. При представлении результатов в логарифмической сетке функцию lg() можно включить в R_2.

Свойства преобразования в целом в первую очередь определяются выбором весовой функции $Q(t, \tau)$. В отношении весовой функции $Q(t, \tau)$ интегрального преобразования необходимо обратить внимание на следующие несколько аспектов:

- структурные особенности, отчасти определяемые способом реализации;
- свойства и приспособленность для выявления и определения значений параметров составляющих процесса;
- ограниченность (строгая или нестрогая) по аргументу t;
- параметр ограничения по времени t может трактоваться как время памяти (в частности, время памяти может охватывать все время наблюдения реализации или иметь меньшее, фиксированное значение T);
- аналитическая и/или графическая формы и математические способы задания.

Как и для вариации Алана, возможны три варианта реализации.

1. Преобразование осуществляется однократно по единственной реализации процесса от начального момента $t = 0$ нестационарным преобразованием (1), определяемым весовой функцией $W(t, \tau)$. В результате получается весь график диаграммы, приспособленный для работы в реальном времени.

2. Преобразование осуществляется ретроспективно, поэтапно, с предварительным разбиением всей реализации по сериям отрезков, длины которых t_i образуют геометрическую прогрессию ($t_{i+1} = kt_i$ или $t_i = k^i t_0$). Результаты по отрезкам одной длины (серии) осредняются. Очевидно, что при этом для малых значений t_i получается большее число отрезков.

3. После выбора ряда значений t_i программно реализуются стационарные фильтры с кусочно-постоянными весовыми функциями $W(t - \tau)$. Представляется целесообразным при этом приближенный переход к представлению в виде дробно-рациональной передаточной функции. Реализация процесса прогоняется через серию фильтров.

Если весовая функция зависит от разности аргументов, т. е. $W(t, \tau) = W(t - \tau)$, то, если исключить из рассмотрения начальный интервал переходного процесса, преобразование является стационарным, в противном случае оно нестационарно. Существовавшие ранее преимущества стационарных преобразований, связанные с возможностями аналоговых средств, в настоящее время сошли до минимума. Однако решающим обычно является соображение, что

стационарные преобразования, даже достаточно сложные в формульных представлениях, имеют ясный физический смысл.

Вместо задания преобразования в виде (1) можно использовать иные способы представления преобразования, например, в виде дифференциального оператора (например, в общем случае дифференциального уравнения). При стационарных преобразованиях они обычно представляются в виде передаточных функций, программно реализуемых в виде рекуррентных процедур или цифровых аналогов.

Поскольку описываемый подход основывается на эвристике, можно просматривать различные варианты свойств преобразуемых сигналов. Целесообразно свойства различных видов преобразований проверять сначала на модели смеси трех составляющих

$$x(t) = x_1(t) + x_2 + x_3(t),$$

где $x_1(t)$ — широкополосная центрированная составляющая с временем корреляции $T_к$; $x_2 = C_1$ — постоянное смещение нуля; $x_3(t) = C_2 t$ — линейный дрейф. В частных случаях могут быть получены хорошо известные характеристики.

Сочетание нормирующего множителя $N(t) = t^{-1}$ с интегралом на всем нарастающем интервале, т. е. в пределах (0, t), при $W = 1$ и $R_1 = R_2 = 1$ означает равномерное линейное осреднение за этот интервал (с сохранением знака), это простейший случай нестационарного преобразования с весовой функцией вида $W_1(t, \tau) = t^{-1}$, приспособленной для определения постоянной составляющей (смещения нуля). Применительно к инерциальному модулю анализ результата такого преобразования может привести к интересным содержательным выводам. Схематично общий вид результатов данного интегрального преобразования такой смеси при разделимости составляющих в логарифмической сетке может различаться (рис. 1, *а*), варианты зависят от знаков коэффициентов C_1 и C_2. Начальный участок представляет собой знакопеременные затухающие колебания от случайной составляющей, причем время затухания определяется ее интервалом корреляции. Следующий, второй — интервал постоянного значения C_1 (с учетом знака). Третий — интервал линейного изменения с учетом знака.

При преобразовании модуля R_1 свойства зависимостей иные (рис. 1, *б*): затухающие колебания на первом интервале от случайной составляющей имеют постоянный знак. Постоянное значение на втором интервале зависит как от коэффициента C_1, так и от дисперсии случайной составляющей. Переход к третьему интервалу, на котором превалирует линейно изменяющая составляющая, может начинаться после временного понижения. Если случайная составляющая интереса не представляет, то следует констатировать, что из результата преобразования на единственном выходе канала получаются коэффициенты двух составляющих сигнала. Однако

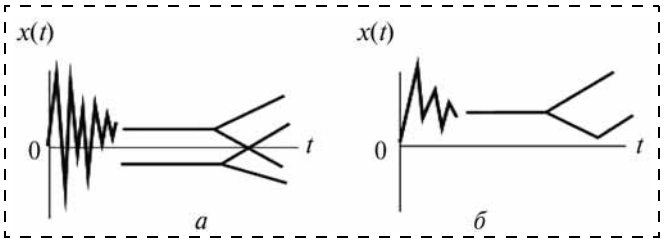

Рис. 1. Результаты интегрального преобразования

заранее невозможно оценить, на каких интервалах будет надежно обнаружена каждая составляющая, что отмечалось как недостаток алгоритма Аллана.

Интегрирование сигнала ДУС от начального момента времени не просто рассматривается как простейшее интегральное преобразование из числа возможных, но оно связано с конкретным его использованием в инерциальных модулях.

Если же пределы интегрирования выбираются соответственно $(t - T)$ и t причем $N(t) = T^{-1}$, то получается скользящее осреднение на интервале постоянной длины T, равномерное текущее сглаживание на интервале времени $[(t - T), t]$ до текущего момента. Сохранение качественных особенностей данного преобразования возможно при близких по виду преобразованиях, желательно с весовой функцией, сохраняющей знак. Скользящее осреднение можно получить также довольно произвольным выбором весовой функции W при $N(t) = 1$, но удовлетворяющей условию

$$\int W(t, \tau) d\tau = 1. \qquad (2)$$

При этом остается широкий выбор вида функции $W(t, \tau)$, в частности, она может быть ступенчатой или гладкой или может быть построена в соответствии с решением задачи оптимизации при определенных гипотезах относительно свойств процессов (наличия шумов, влияние которых на результат преобразования желательно уменьшать) и т. д. От выбора этой функции зависит степень влияния на результат различных, всегда реально присутствующих переменных составляющих.

Возможно также использование линейного фильтра, алгоритм которого представляется в виде дифференциального уравнения со специально подобранными коэффициентами. Если это преобразование (независимо от того, реализуется ли оно в виде интегрального преобразования или многократного интегрирования дифференциальных уравнений) имеет свойства фильтра нижних частот с частотой среза ω^*, то его использование практически равносильно текущему осреднению за время $T = (\omega^*)^{-1}$. У некоторых датчиков с аналоговым выходом предусматривается простейший способ сглаживания подключением конденсаторов, осуществляющих сглаживание, так что уровень сглаживания просто можно эмпирически подбирать непосредственно в процессе работы.

Следует отметить, что если при обработке данных программное осреднение не осуществляется,

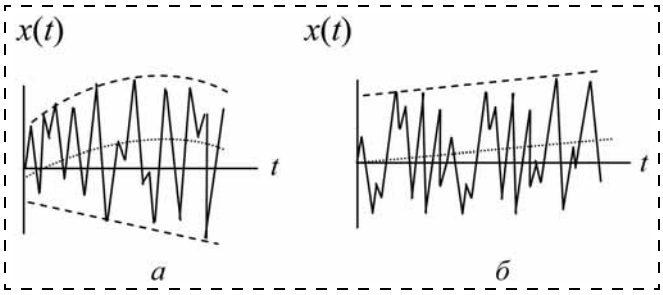

Рис. 2. Полосы изменяющихся составляющих

то при непосредственной регистрации сигнала датчика в виде записи получаются более или менее широкая зона, полоса размытия медленно изменяющихся составляющих высокочастотными или широкополосными шумовыми составляющими (рис. 2, *а*). При этом шумом маскируются видимые, относительно низкочастотные составляющие процесса (штриховые линии), их грубо можно оценивать по огибающим этой полосы, если шумовая составляющая стационарна (рис. 2, *б*). Но при этом даже не всегда правильно определяется даже тенденция изменения медленно изменяющейся составляющей.

При таких грубых оценках, естественно, становятся невозможными определенные количественные оценки показателей точности. При использовании сглаживающего фильтра нижних частот, с одной стороны, нужно значительно снизить уровень шумов, а с другой стороны, не потерять эффект изменчивости низкочастотной составляющей. Если требуется, вместо фильтра нижних частот может быть использован фильтр, вырезающий заданный диапазон частот (не обязательно узкий) с ограничениями снизу и сверху.

При $N(t) = t^{-1}$ в нелинейных преобразованиях $R_1 = [\cdot]^2$ и $R_2 = 1$ с интегрированием на всем текущем интервале $(0, t)$ при $Q = 1$ получается оценка второго нецентрированного момента функции времени. Для центрированного стационарного процесса при $R_1 = [\cdot]^2$ и $R_2 = 1$ получается оценка дисперсии

$$\sigma^2 = t^{-1}\int_0^t x^2(\tau)d\tau. \qquad (3)$$

Для определения среднеквадратичного значения σ в выражении (1) следует взять $R_1 = [\cdot]^2$ и $R_2 = [\cdot]^{1/2}$. Но совсем необязательно строить классические квадратичные оценки. Например, как отмечалось выше, в качестве характеристики рассеяния можно принять весовую функцию модульной, тогда получится среднемодульное значение, знак при этом также теряется, но отпадает необходимость осуществлять еще одно преобразование R_2. Во всех случаях нет необходимости использовать какие-либо предположения о сходимости оценок или пытаться доказывать или опровергать сходимость по результатам обработки данных.

При сохранении неизменными общих принципов формирования преобразований конкретизацией алгоритма, записываемого в виде (1), можно решать другие задачи. Заданием нелинейной функции R_1, принимающей нулевые значения на заданном интервале $(-a, +a)$, при последующем суммировании интервалов времени можно получать характеристики выбросов за уровень a; такое преобразование можно использовать при определении по результатам испытаний порогов чувствительности ДУС.

Можно строить многоканальное преобразование таким образом, чтобы на выходах отдельных каналов получать классические оценки спектральных плотностей. Например, если весовая функция представляет затухающий колебательный процесс с частотой ω, то этот канал может рассматриваться как узкополосный фильтр, настроенный на эту частоту. Из таких фильтров, настроенных определенным образом на частоты (обычно в геометрической прогрессии) выбранной последовательности частот, обычно строится широкополосный спектроанализатор или анализатор спектра.

По результатам применения подобных преобразований можно строить диаграммы, вид которых зависит как от алгоритмов (выбора входящих в них функций W, R_1, R_2, N), так и от моделей процессов. Масштабы по осям можно подбирать по желанию так, чтобы в результате получались кривые определенного вида.

Рассмотрим несколько примеров. Например, для "чистой" модели недетерминированного центрированного стационарного случайного процесса результат осреднения по начальному участку при $W = 1$, $R_1 = [\cdot]^2$, $R_2 = 1$, $N(t) = t^{-2}$ (типичной, но упрощенной) будет зависимость такого вида, как изображено на рис. 3, *а*, а при $N(t) = t$ — как на рис. 3, *б*.

По этим диаграммам можно грубо оценить интервал $T_к$ корреляции, Иные результаты получатся, если процесс нецентрированный. Для реальных процессов, которые лишь очень приближенно можно считать стационарными, не стоит ожидать сходимости, а неубывающие видимые отклонения от постоянного значения могут содержать полезную информацию об отличиях модели от стационарной и о других составляющих процесса.

Рассмотрим на примере влияние нормирующего множителя $N(t)$. При использовании модели погрешности, включающей стационарную случай-

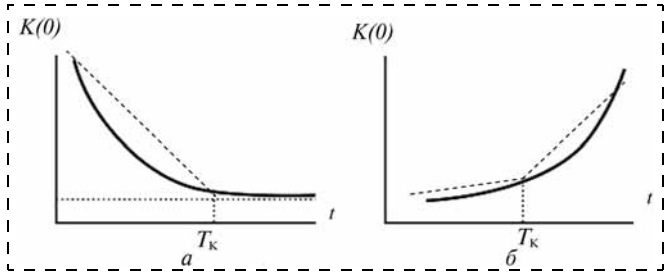

Рис. 3. Типичные зависимости для недетерминированного центрированного стационарного случайного процесса

ную составляющую $n(t)$ и детерминированную квадратичную составляющую

$$u(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + n(t), \qquad (4)$$

по результатам применения операции равномерного осреднения модуля

$$F\{u(t)\} = N(t)\int|[u(\tau)]|d\tau \qquad (5)$$

на нарастающих, больших интервалах времени, на которых практически не проявляется случайная составляющая, можно определить и наглядно представить постоянную, линейно и квадратично нарастающие составляющие (конечно, при потере их знаков). При представлении результатов в логарифмической сетке в зависимости от выбора нормирующего множителя $N(t)$ будут получаться зависимости, имеющие примерно такой вид, как показано на рис. 4, *а*, *б*, *в*.

Всегда получаются четыре участка, по числу составляющих в сигнале. Наклоны участков в логарифмической сетке кратны 20 дБ/дек. Моменты времени изломов, перехода от одних прямолинейных участков к другим для всех вариантов построения для всех трех графиков одни и те же. Преимущества использования той или иной диаграммы определяются тем, какой из участков получается горизонтальным (реально — близким к горизонтальному), на них проще определяются параметры соответствующих составляющих. Отсутствие какого-либо из участков (например, среднего) будет свидетельствовать о том, что соответствующая составляющая алгоритма рассматриваемого класса практически не наблюдаема. Но это не означает, что эти составляющие не могут быть обнаружены и идентифицированы в многоканальной системе параллельного типа.

Присутствие составляющей в виде стационарного шума может привести к появлению промежуточного участка между первым и вторым (с промежуточным наклоном). Если в процессе $u(t)$ важной и высокой по

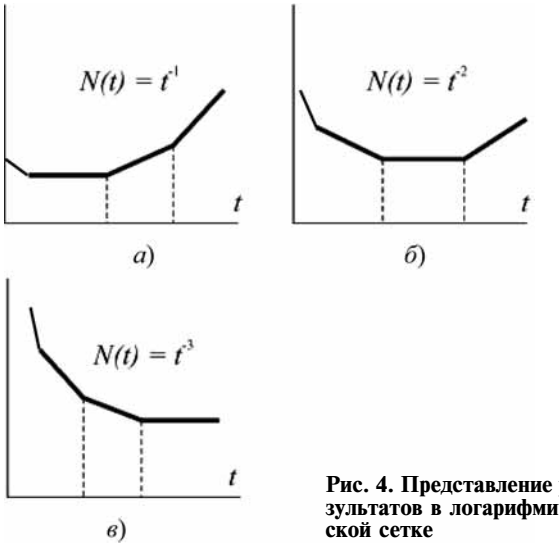

Рис. 4. Представление результатов в логарифмической сетке

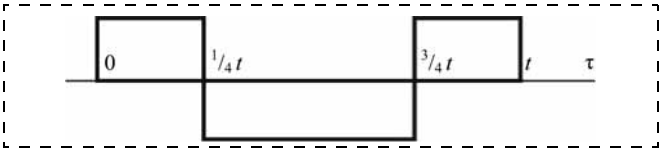

Рис. 5. Вид функции $Q(t, \tau)$

уровню является стационарная недетерминированная составляющая, то целесообразно выбрать $N(t) = t^{-1}$, $R_1 = [\cdot]^2$, $R_2 = 1$. Тогда результатом преобразования будет дисперсия этой составляющей. Выбором весовой функции $W(t, \tau)$ можно также получить корреляционную функцию и при ее приближенном получении использовать также эффект сглаживания.

Вместе с тем, в прямое развитие алгоритма Аллана, при использовании которого устраняется постоянная составляющая, могут быть построены преобразования, исключающие из выходных сигналов составляющие других видов. Например, если кусочно-постоянную весовую функцию преобразования выбрать в форме, основанной на идее определения только квадратичной составляющей и исключающей постоянную и линейную составляющую, то можно весовую функцию $W(t, \tau)$ взять в виде

$$W(t, \tau) = N(t)Q(t, \tau); \qquad (6)$$

$$Q(t, \tau) = +1 \text{ при } 0 < \tau < \frac{1}{4}t;$$

$$-1 \text{ при } \frac{1}{4}t < \tau < \frac{3}{4}t;$$

$$+1 \text{ при } \frac{3}{4}t < \tau < t.$$

Функция $Q(t, \tau)$ в этом случае имеет такой вид, как показано на рис. 5. При этом показатель степени k нормирующего множителя $N(t) = t^k$ может быть произвольным. Такое преобразование может быть использовано в многоканальной схеме наряду с другими, в других каналах, предназначенных для определения иных составляющих.

Вывод

В результате такого преобразования будут исключены постоянная и линейно изменяющаяся во времени составляющие, а недетерминированные шумовые составляющие будут проявляться так же, как и при использовании алгоритма Аллана [1].

Список литературы

1. **Евстифеев М. И., Степанов О. А., Челпанов И. Б.** Испытания микромеханических приборов: учеб. пособие. Санкт-Петербург: Изд-во ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор". 2013. 210 с.

2. **Челпанов И. Б.** Автоматические технологические машины и оборудование. Испытания машин. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГПУ, 2008. 296 с.

3. **Евстифеев М. И., Розенцвейн Д. В., Челпанов И. Б.** Анализ прочности упругих подвесов микромеханических гироскопов // Гироскопия и навигация. 2009. № 3. С. 22—34.

4. **Челпанов И. Б., Кочетков А. В.** Вопросы использования и стандартизации микромеханических датчиков угловой скорости и акселерометров // Приборы. 2012. № 10. С. 13—22.

УДК 681.586.7

Н. С. Землянников[1], мл. науч. сотр., e-mail: skiv89@gmail.com,
Н. Л. Данилова[1], ст. науч. сотр., e-mail: n.danilova@tcen.ru,
В. В. Панков[1], ст. науч. сотр., e-mail: v.pankov@tcen.ru,
В. С. Суханов[1], нач. лаб., e-mail: vs@tcen.ru,
Р. О. Гаврилов[1, 2], науч. сотр.,
Ю. А. Михайлов[2], канд. техн. наук, руководитель группы
[1] Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук (ИНМЭ РАН), г. Москва
[2] НПК "Технологический центр", г. Москва

КОНСТРУКЦИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА МАЛЫЕ ДАВЛЕНИЯ С ПОВЫШЕННОЙ ПЕРЕГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ

Поступила в редакцию 19.11.2012

Приведены результаты исследования тензорезистивных преобразователей давления со сложнопрофилированной кремниевой мембраной, изготовленных по микроэлектронной технологии. Показаны конструктивные решения, использованные в чувствительных элементах избыточного давления для обеспечения повышенной перегрузочной способности.

Ключевые слова: *сложнопрофилированная кремниевая мембрана, чувствительный элемент давления, преобразователь избыточного давления, перегрузочная способность*

В настоящее время одним из самых распространенных направлений построения датчиков давления является разработка интегральных тензорезисторных преобразователей с максимальным использованием достижений физики полупроводников и микроэлектронной технологии [1, 2]. Высокая чувствительность полупроводниковых тензорезисторов, высокая стабильность и надежность, технологическая совместимость с интегральными микросхемами обработки сигнала, миниатюрные размеры полупроводниковых чувствительных элементов (ЧЭ), возможность применения групповой технологии изготовления являются их основными достоинствами.

Многодиапазонные датчики давления на одном кристалле ЧЭ должны отвечать метрологическим характеристикам, обеспечивающим использование кристалла для нескольких диапазонов номинального давления из ряда значений по ГОСТ 22520—85. При этом тензорезистивный кристалл интегрального преобразователя давления (ИПД) должен выдерживать перегрузки, значительно превышающие номинальные давления. Из условий сборки датчиков на малые давления кристалл ИПД должен выдерживать действие давления не менее 140 кПа. Это означает, что кристалл ИПД на номинальное давление 10 кПа должен выдерживать перегрузку, в 14 раз превышающую номинальное давление, а кристалл ИПД на номинальное давление 1 кПа должен выдерживать перегрузку, в 140 раз превышающую номинальное давление.

Известны работы [3, 4], в которых рассматривались параметры преобразователей давления с использованием кремниевых мембран с центральным выступом (жестким центром) для защиты от перегрузок при измерении давлений. Такая конструкция обеспечивает механический упор для мембраны при воздействии перегрузки и тем самым повышает ее перегрузочную способность. В работах [3, 4] рассмотрена конструкция чувствительного элемента, состоящая из кристалла ИПД и стеклянного основания. Соединение стеклянного основания и кристалла ИПД осуществлялось методом анодной посадки [5]. В стеклянном основании выполнено углубление, глубина которого определяется прогибом мембраны (несколько микрометров) при приложении к мембране номинального давления. Как показали исследования [4], использование чувствительного элемента с применением стекла и технологии анодной посадки для ИПД с малой толщиной мембраны ограничено по причине значительных погрешностей по уходу "нуля" при всестороннем сжатии.

В настоящей статье приведена конструкция чувствительного элемента на малые давления с повышенной перегрузочной способностью, которая включает кристалл ИПД5.2 с тремя жесткими центрами и кремниевую прокладку с выступами, ограничивающими прогиб мембраны. Чувствительный элемент давления (ЧЭД) представляет собой сборку, состоящую из кристалла и переходных деталей в виде кремниевых прокладок и основания. Элементы модуля ЧЭД, как правило, соединяются низкотемпературным стеклом при температурах 410...420 °С под давлением в вакууме. Значение вакуума для соединения ЧЭД не хуже 10^{-6} мм. рт. ст. Конструкция ЧЭД обеспечивает развязку кристалла ИПД от деформаций корпуса, в котором он размещается, в широком интервале температур (от −60 до +125 °С) [6].

Применение конструкции кристалла ИПД с тремя жесткими центрами [7] имеет ряд неоспоримых преимуществ по сравнению с конструкциями без концентраторов и с одним жестким центром: во-первых, высокий выходной сигнал, во-вторых, минимальные температура гистерезиса и нелинейность. На их основе удается получить воспроизводимые преобразователи давления с верхним пределом измерения от 2,5 до 25 кПа для кристалла ИПД5,2 (размер кристалла 6,2 × 6,2 мм) и от 0,04 до 2,5 МПа для кристалла ИПД6 (размер кристалла 4 × 4 мм).

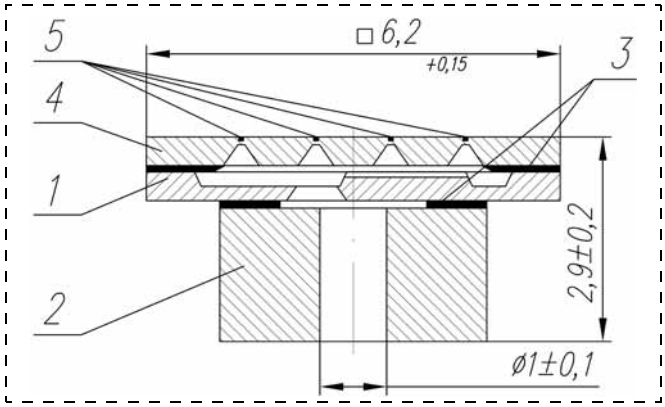

Рис. 1. Конструкция ЧЭД с защитой от перегрузки:
1 — прокладка; *2* — кремниевое основание; *3* — стекло (~10 мкм); *4* — кристалл ИПД5.2; *5* — тензорезисторы

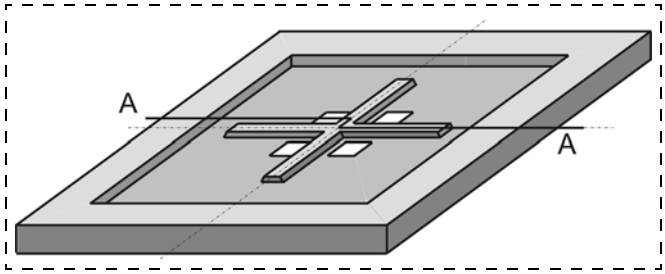

Рис. 2. Конструкция прокладки для защиты ЧЭД от перегрузки

На рис. 1 приведена конструкция чувствительного элемента, в которую введена прокладка с выступами для защиты мембраны от разрушения при действии перегрузочного давления. Общий вид прокладки приведен на рис. 2. В прокладке сформирован выступ крестообразной формы, четыре отверстия в дне прокладки для подачи давления под мембрану кристалла ИПД. На рис. 1 прокладка *1* приведена в сечении А—А (рис. 2).

Прокладка формируется анизотропным травлением с двух сторон. В технологии заложена возможность обнижения на несколько микрометров крестообразного выступа относительно краев прокладки.

Выходные характеристики преобразователей исследовались в конструкции, приведенной на рис. 3. Выходные характеристики для тестовых образцов (№ № 9, 10, 11—13) представлены на рис. 4.

Для всех образцов, характеристики которых представлены на рис. 4, использовалась прокладка с "обнижением" упора на 5 мкм. Параметры мембраны кристалла ИПД5.2 рассчитывались на номинальное давление 2,5 кПа. Начиная с давления примерно 30...40 кПа, для всех образцов практически отсутствует зависимость выходного напряжения от давления, в отличие от результатов работ [3, 4]. Постоянство выходного напряжения указывает на то, что мембрана прогнулась до касания жесткими центрами упора на прокладке. При неоднократном повторении измерений прямой и обратный ход полностью совпадали. Разрушение образцов наблюдалось при подаче давления 400...500 кПа.

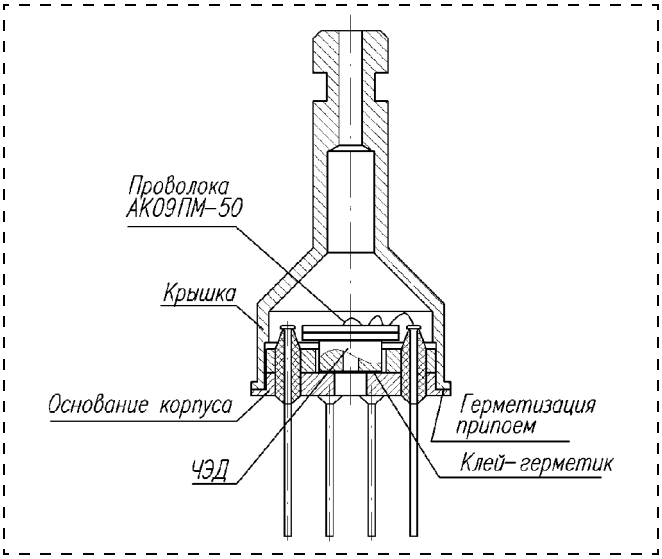

Рис. 3. Конструкция преобразователей избыточного давления

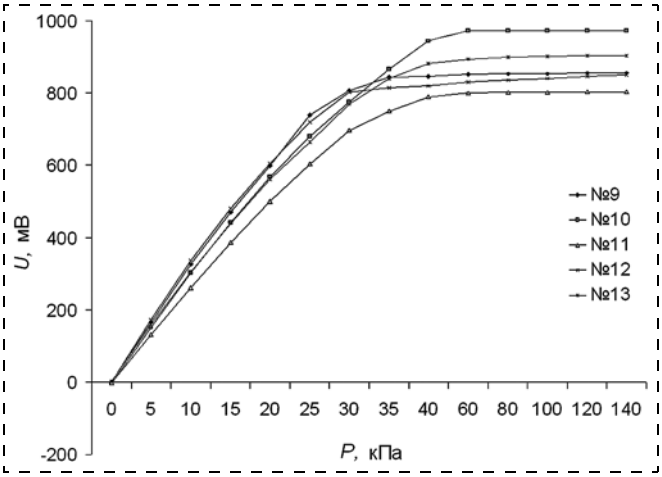

Рис. 4. Зависимость выходного напряжения от давления для преобразователей избыточного давления с защитой от перегрузки

Заключение

Разработана конструкция чувствительного элемента, обеспечивающая защиту интегральных преобразователей на малые давления от разрушения при перегрузке.

В конструкции ЧЭД используется тензорезистивный кристалл с тремя жесткими центрами на мембране и прокладка с крестообразным упором.

Выходное напряжение на давление 10 кПа составляет менее 200 мВ при напряжении питания 5 В. Указанные ЧЭД могут быть использованы на давления от 2,5 до 10 кПа. Допустимая перегрузка в несколько раз превышает требования, предъявляемые к преобразователям по перегрузочному давлению.

Исследование и измерение параметров проводились на оборудовании ЦКП "Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники" при финансовой поддержке Минобрнауки России (госконтракт от 19 апреля 2011 г. № 16.513.11.3054).

Список литературы

1. **Амеличев В. В., Данилова Н. Л., Панков В. В., Тарасов В. А.** Конструктивно-технологический базис многовариантного производства интегральных полупроводниковых тензопреобразовагелей // Нано-и микросистемная техника. 2007. № 3. С. 2—4.
2. **Амеличев В. В., Павлов А. Ю., Погалов А. И., Чаплыгин Ю. А.** Конструктивно-технологическая оптимизация интегральных преобразователей физических величин // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 3. С. 14—17.
3. **Ушков А. В., Козлов А. Н.** Проектирование, изготовление и исследование кремниевых чувствительных элементов давления со встроенной защитой от перегрузок // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 5. С. 49—51.
4. **Ушков А. В., Козлов А. Н.** Исследование путей увеличения перегрузочной способности кремниевых мембран и разработка чувствительного элемента давлений со встроенной защитой от перегрузок // Молодежь в науке: Сб. докладов V научно-технической конференции. Саров: ФГУП "РФЯЦ ВНИИЭФ", 2007. С. 558—561.
5. **Ko W. H., Suminto J. T., Yeh G. J.** Bonding techniques for microsensors in Micromachining and Micropackaging of Transducers. Amsterdam (The Netherlands): Elsevier, 1985. P. 41—47.
6. **Шелепин Н. А., Данилова Н. Л., Панков В. В., Суханов В. С.** Преобразователи давления — микросхемы серии 1191, 1192 // Датчики и системы. 2007. № 1. С. 28—35.
7. **Игнатьева Е. В., Михайлов Ю. А., Панков В. В.** О повышении чувствительности кремниевых интегральных тензопреобразователей // Датчики и системы. 2010. № 6, С. 17—20.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

УДК 539.25:620.187

А. В. Заблоцкий[1, 2], канд. физ.-мат. наук, науч. сотр.,
А. Ю. Кузин[2], д-р техн. наук, проф., зам. ген. директора,
Н. Н. Михеев[3], канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,
Н. А. Никифорова[4], аспирант,
М. А. Степович[4, 5], д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф.,
П. А. Тодуа[1, 2], д-р физ.-мат. наук, проф., ген. директор,
М. Н. Филиппов[1, 2, 6], д-р физ.-мат. наук, проф., гл. науч. сотр., e-mail: fgupnicpv@mail.ru

[1] Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Московская обл.,
[2] Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума, Москва,
[3] Филиал Института кристаллографии имени А. В. Шубникова РАН Научно-исследовательский центр "Космическое материаловедение", Калуга, Россия,
[4] Калужский государственный университет им. К. Э. Циолковского,
[5] Ивановский филиал Российского государственного торгово-экономического университета,
[6] Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН, Москва

МОДЕЛЬ КВАДРАТИЧНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ НЕОСНОВНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПРЯМОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ ДЛЯ КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Поступила в редакцию 13.11.2012

Рассмотрена возможность использования математической модели квадратичной рекомбинации неосновных носителей заряда, генерированных в однородном прямозонном полупроводниковом материале электронным пучком, для идентификации электрофизических параметров мишени.

Ключевые слова: *катодолюминесцентные полупроводники, растровая электронная микроскопия, рекомбинация*

Электрофизические параметры прямозонных полупроводников могут быть получены путем обработки зависимости интенсивности I монохроматической катодолюминесценции (КЛ) от энергии электронов пучка E_0 [1—3]. Ранее показано, что для КЛ, обусловленной только линейной рекомбинацией неосновных носителей заряда (ННЗ) для идентификации параметров полупроводниковых

материалов по зависимости $I(E_0)$ может быть использован так называемый метод конфлюентного анализа (МКА) [4]. В настоящей работе рассматривается возможность использования для идентификации электрофизических параметров модели квадратичной рекомбинации ННЗ.

В математической модели квадратичной рекомбинации ННЗ, реализующейся в случае высокого уровня возбуждения, зависимость интенсивности монохроматической КЛ от энергии электронов пучка E_0 и диффузионной длины L ННЗ мишени может быть описана в виде [5]:

$$I(E_0,\ L) \approx \left\{\frac{G\tau}{\sigma L}\left[1 - \frac{S-1}{S+1}\exp\left(-\frac{2z_c}{L}\right)\right]\right\}^2 \Phi(z_c,\ L). \quad (1)$$

Здесь G — число ННЗ одного знака, возбуждаемых электронным пучком в единицу времени (без учета поверхностной рекомбинации); S — приведенная скорость поверхностной рекомбинации; τ — время жизни и L — диффузионная длина ННЗ; σ — площадь плоского источника ННЗ, расположенного параллельно поверхности образца на глубине z_0. В выражение для $I(E_0,\ L)$ входит поправочная функция $\Phi(z_c,\ L)$, учитывающая уменьшение интенсивности КЛ в области генерации ННЗ при $z_c > 2L$. Эта функция может быть представлена в виде

$$\Phi(z_c,\ L) = \exp(-\beta(z_c - 2L)), \quad (2)$$

где эмпирическая константа β зависит от полупроводника, а z_c — координата центра тяжести области генерации ННЗ [5]

$$z_c = \frac{1}{G_0}\int_0^\infty z\rho(z)dz, \quad (3)$$

где $G_0 = \int_0^\infty \rho(z)dz$, $\rho(z) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} \rho(x,\ y,\ z)dxdy$. Плотность потерь энергии электронным зондом в мишени $\rho(x,\ y,\ z)$ приведена в работе [6], а мощность источника ННЗ G с учетом поверхностной рекомбинации определяется выражением [5]

$$G = G_0\left[1 - \frac{S-1}{S+1}\exp\left(-\frac{2z_c}{L}\right)\right]. \quad (4)$$

Отметим, что если $z_c \leqslant 2L$, то ННЗ генерируются в непосредственной близости от поверхности полупроводника, их плотность достаточно высока и превышает пороговую практически во всей области генерации. Поэтому условие квадратичной рекомбинации выполняется практически для всех ННЗ и в этом случае можно считать $\Phi(z_c,\ L) = 1$.

Минимизируемый функционал, как и для случая линейной рекомбинации, имеет вид

$$F = \sum_{i=1}^{\infty}\left[I_i - I\left(E_0^i,\ L\right)\right]^2, \quad (5)$$

где I_i — экспериментальные (при математическом моделировании — задаваемые) значения интенсивности КЛ; $I\left(E_0^i,\ L\right)$ — рассчитанные согласно (1) значения интенсивностей для всех n рассматриваемых значений энергий электронов пучка E_0^i, $i = \overline{1,\ n}$.

Математическое моделирование зависимостей $I(E_0,\ L)$ и оценка возможностей использования таких зависимостей для идентификации электрофизических параметров полупроводниковых материалов проведены для некоторых прямозонных полупроводниковых мишеней, при этом полученные результаты качественно были одинаковыми. В качестве примера результатов таких расчетов на рис. 1—3 представлены типичные результаты математического моделирования. Расчеты проведены для параметров полупроводника, характерных для одного из наиболее хорошо изученных и используемых в микро- и наноэлектронике материалов — арсениде галлия, при этом был взят участок кривой с энергией электронов пучка E_0 в диапазоне от 20 до 50 кэВ, поскольку в этом диапазоне основной вклад в КЛ GaAs дает квадратичная рекомбинация, и линейным слагаемым можно пренебречь [5]. На рассматриваемом участке было выбрано $n = 13$ значений энергии с шагом 2,5 кэВ. Далее анализировали зависимость функционала (5) от диффузионной длины ННЗ L. При расчетах использованы следующие параметры материала: атомный номер $A = 72$; заряд ядра $Z = 32$; плотность $\rho = 5{,}32$ г$\cdot$см$^{-3}$; диффузионная длина $L = 0{,}8$ мкм; константа $\beta = 0{,}06$ мкм$^{-1}$ [6, 11]; приведенная

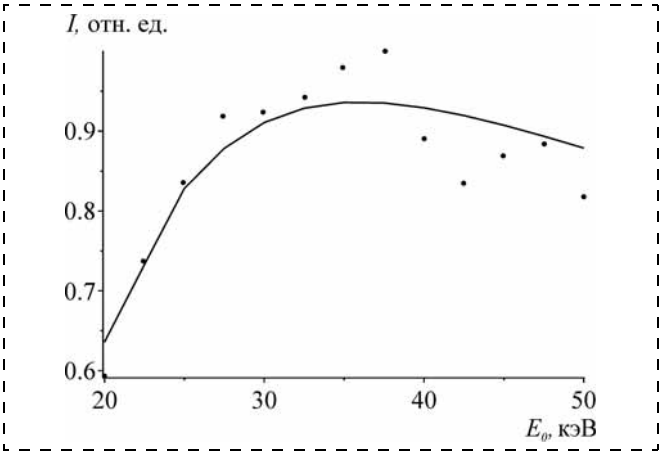

Рис. 1. Результаты математического моделирования зависимости интенсивности КЛ от энергии электронов пучка для монокристаллического GaAs. Сплошная линия — зависимость $I_i(E_0)$, рассчитанная по формуле (1). Точки — значения интенсивности КЛ, полученные в результате наложения случайных ошибок с нулевым математическим ожиданием и дисперсией $0{,}1I_i$

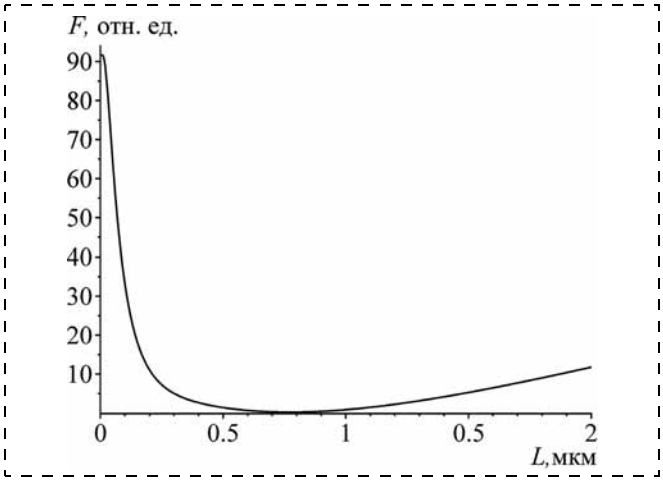

Рис. 2. Зависимость минимизируемого функционала $F(L)$ от диффузионной длины L ННЗ для монокристаллического GaAs

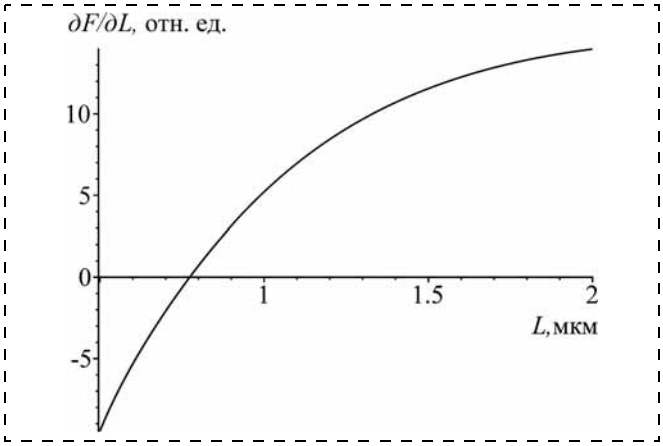

Рис. 3. Зависимость первой производной функционала dF/dL от диффузионной длины L. Начальное приближение параметра $L^{(0)}$, найденное МНК, для монокристаллического GaAs равно 0,77 мкм (при расчетном значении L = 0,8 мкм)

скорость поверхностной рекомбинации $S = 100$, что эквивалентно случаю $S \to \infty$, время жизни ННЗ $\tau = 10^{-8}$ с [5, 7].

Расчеты проводили с помощью ЭВМ на базе процессора Intel Pentium 4 с тактовой частотой 3,2 ГГц и 2 Гбайт ОЗУ с использованием программного пакета Maple.

На рис. 1 сплошной линией показана зависимость $I_i(E_0)$, рассчитанная по формуле (1); точки — значения интенсивности КЛ, полученные в результате наложения случайных ошибок с нулевым математическим ожиданием и дисперсией $0{,}1I_i$.

Результаты расчетов зависимости минимизируемого методом наименьших квадратов функционала $F(L)$ от диффузионной длины ННЗ L показаны на рис. 2. Исследуемый функционал имеет один минимум в области идентифицируемого значения диффузионной длины ННЗ L, который соответствует начальному приближению $L^{(0)}$ в МКА. Положение минимума может также быть определено из зависимости от L первой производной функционала dF/dL (рис. 3).

Отметим, что в случае КЛ, обусловленной только линейной рекомбинацией ННЗ, аналогичный функционал может иметь несколько локальных экстремумов, как минимумов, так и максимумов, и для корректного решения задачи идентификации диффузионной длины ННЗ L необходимо так организовать вычисления для функционала $F(L)$, чтобы исключить из рассмотрения локальные минимумы в области других значений идентифицируемого параметра [8].

* * *

Для КЛ некоторых прямозонных полупроводниковых материалов, обусловленной только квадратичной рекомбинацией ННЗ, использование подхода, характерного для МНК, приводит к функционалу, имеющему всего лишь один минимум, который соответствует начальному приближению искомого параметра.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (государственный контракт № 16.523.12.3005) с использованием оборудования Центров коллективного пользования МФТИ и НИЦПВ, Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 10-03-00961), а также РФФИ и правительства Калужской области (проект № 12-02-97519).

Список литературы

1. **Wittri D. B., Kyser D. F.** Measurement of Diffusion Lengths in Direct-Gap Semiconductors by Electron-Beam Excitation // J. Appl. Phys. 1967. V. 38, N 1. P. 375.

2. **Rao-Sahib T. S., Wittri D. B.** Measurement of Diffusion Lengths in p-Type Gallium Arsenide by Electron Beam Excitation // J. Appl. Phys. 1969. V. 40, N 9. P. 3745.

3. **Михеев Н. Н., Петров В. И., Степович М. А.** Количественный анализ материалов полупроводниковой оптоэлектроники методами растровой электронной микроскопии // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1991. Т. 55, № 8. С. 1474.

4. **Грешилов А. А., Стакун В. А., Стакун А. А.** Математические методы построения прогнозов. М.: Радио и связь, 1997. 112 с.

5. **Михеев Н. Н., Никоноров И. М., Петров В. И., Степович М. А., Аль Шаер В.** Катодолюминесценция полупроводников в условиях высокого уровня возбуждения // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1990. Т. 54, № 2. С. 267.

6. **Михеев Н. Н., Степович М. А.** Распределение энергетических потерь при взаимодействии электронного зонда с веществом // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1996. Т. 62, № 4. С. 20.

7. **Михеев Н. Н., Поляков А. Н., Степович М. А.** О возможности использования конфлюентного анализа в катодолюминесцентной микроскопии для интервального оценивания диффузионной длины неосновных носителей заряда и глубины приповерхностной области, обедненной основными носителями заряда. Результаты математического моделирования // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2009. № 10. С. 87.

8. **Поляков А. Н., Степович М. А., Лапшинова Е. Н.** и др. Проблема идентификации параметров прямозонных полупроводников по зависимости интенсивности монохроматической катодолюминесценции от энергии электронов пучка // Прикладная физика. 2009. № 3. С. 119.

УДК 537.312.7

А. С. Батурин[1], канд. физ.-мат. наук, доц.,
К. В. Булах[1], студент,
И. П. Григал[1], аспирант,
К. В. Егоров[1], студент,
А. В. Заблоцкий[1], канд. физ.-мат. наук, доц.,
А. М. Маркеев[1], канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.,
Ю. Ю. Лебединский[3], канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,
Е. С. Горнев[2, 1], д-р техн. наук, проф., глав. науч. сотр.,
О. М. Орлов[2, 1], канд. техн. наук, вед. науч. сотр., нач. лаб.,
А. А. Чуприк[1], канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., e-mail: chouprik@mail.ru

[1] Московский физико-технический институт (государственный университет), г. Долгопрудный, Россия

[2] Научно-исследовательский институт молекулярной электроники, г. Зеленоград, Россия

[3] Научно-исследовательский ядерный университет "МИФИ", г. Москва, Россия

ЭФФЕКТ РЕЗИСТИВНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В ОКСИДНЫХ ПЛЕНКАХ $Hf_xAl_{1-x}O_y$ С ПЕРЕМЕННЫМ СОСТАВОМ, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ АТОМНО-СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ

Поступила в редакцию 09.11.2012

В качестве функционального диэлектрического слоя ячейки резистивной памяти ReRAM разработаны и выращены методом атомно-слоевого осаждения тонкие пленки трехкомпонентного оксида $Hf_xAl_{1-x}O_y$ с переменным (по глубине) содержанием Al. Выполнено неразрушающее профилирование оксидной пленки по глубине с использованием методики рентгено-фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением. В структурах металл—диэлектрик—металл $TiN/Hf_xAl_{1-x}O_y/Pt$ и $Pt/Hf_xAl_{1-x}O_y/TiN$ исследован эффект резистивного переключения.

Ключевые слова: эффект резистивного переключения, атомно-слоевое осаждение, энергонезависимая память, оксид гафния

Введение

При достижении минимального топологического размера 16 нм дальнейшая минитюаризация флэш-памяти станет невозможна в силу физических и технических ограничений, в частности, возможностей литографии, а также хранения заряда плавающего затвора величиной в несколько элементарных зарядов. Наиболее перспективным кандидатом в качестве энергонезависимой памяти следующего поколения является резистивная память с произвольным доступом (Resistive Random Access Memory — ReRAM) [1]. Поскольку, в отличие от флэш-памяти, ячейка ReRAM имеет простую структуру, для ReRAM прогнозируется достижение минимального размера до 8 нм. Другими стимулами для разработки ReRAM-технологии являются низкая стоимость на бит, малое напряжение при записи-перезаписи (1...5 В) и, соответственно, малое энергопотребление — менее 1 пДж на акт записи-перезаписи, высокая скорость записи-перезаписи (менее 1 нс), большая продолжительность использования (число циклов записи-перезаписи до 10^9), длительное время хранения информации (более 10 лет), а также возможность 3D-интеграции, в частности, возможность размещения ячеек памяти между слоями металлизации.

В основе функционирования ReRAM лежит эффект резистивного переключения — обратимого изменения электрического сопротивления элемента ячейки памяти под действием электрического поля. Элемент ReRAM обычно представляет собой структуру металл—диэлектрик—металл (МДМ). Существует несколько общепринятых механизмов резистивного переключения и, соответственно, типов ReRAM. Данная работа посвящена одному из наиболее многообещающих типов ReRAM, резистивный эффект в которой обусловлен реакцией восстановления/окисления (reduction/oxidation — redox ReRAM) оксида, используемого в качестве диэлектрика в элементе ReRAM. Реакции восстановления/окисления оксида сопутствует дрейф ионов кислорода и, соответственно, вакансий кислорода по глубине слоя оксида. Вакансии кислорода являются ловушками для электронов, по которым происходит перенос заряда от одного металлического электрода к другому [2]. В зависимости от концентрации вакансий кислорода и их распределения в оксиде МДМ структура может находиться в высокоомном (high resistance state — HRS) или низкоомном (low resistance state — LRS) состоянии. Для достижения стабильного эффекта резистивного переключения необходимо уметь контролировать концентрацию вакансий кислорода в оксидном слое.

В качестве функциональных оксидов часто используют оксиды переходных металлов, например, NiO_x [3], TiO_x [4], CuO_x [5], HfO_x [6]. Одним из механизмов управления концентрацией вакансий кислорода на этапе изготовления ReRAM-ячейки является легирование оксида металла со степенью окисления +4 ионами металла со степенью окисления +3. Так, в работе [7] теоретически показано, что при легировании ZrO_2 примесью Al^{+3} энергия образования вакансий кислорода снижается примерно в 1,7 раза. В силу близости структурных и

электронных свойств оксидов циркония и гафния подобный способ управления концентрацией вакансий кислорода возможен и в оксиде гафния HfO_2. Оксид гафния наиболее удобен с точки зрения внедрения в производство, так как материал на его основе используется в современной технологии в качестве подзатворного диэлектрика. Дополнительным источником вакансий кислорода может служить один из электродов ReRAM-ячейки, например, электрод из нитрида титана TiN, который является эффективным резервуаром кислорода и, соответственно, источником вакансий кислорода. Сочетание двух подходов — легирования оксидного слоя и использование электрода из активного по отношению к кислороду материала — должно стать эффективным средством контролирования концентрации вакансий кислорода в оксидном слое и достижения стабильного эффекта резистивного переключения.

Для обеспечения долговременной стабильности и надежности ReRAM необходимо обеспечить пространственное ограничение областей, где происходит зарождение и перемещение вакансий кислорода. Достижение этой цели возможно при изменении концентрации примеси Al по глубине оксида. Целью данной работы было создание нового материала для тонких ReRAM-пленок трехкомпонентного оксида $Hf_xAl_{1-x}O_y$ с переменным (по глубине) содержанием Al, а также исследование структурно-химических и электрофизических характеристик получаемых пленок.

Методики эксперимента

В данной работе было исследовано три типа структур: пленки $Hf_xAl_{1-x}O_y$, выращенные на подслоях Pt и TiN, и контрольная пленка HfO_2 (см. таблицу).

Пленки $Hf_xAl_{1-x}O_y$ были выращены методом атомно-слоевого осаждения (АСО) в реакторе Sunale R-150 Picosun OY с горячими стенками при пониженном давлении (500 Па) и температуре подложек 240 °С. В качестве подложек использовали кремниевые пластины с выращенными на них пленками Pt и TiN. В качестве газа носителя и для продувки камеры использовали азот особой чистоты (99,999 %). В целях получения переменной концентрации Al по глубине пленки атомно-слоевое осаждение состояло из шести реакционных серий суперциклов с различным отношением числа n циклов $Al(CH_3)_3$ — H_2O и числа m циклов $Hf[N(CH_3)(C_2H_5)]_4$ — H_2O (см. таблицу). Число k суперциклов в каждой серии подбирали таким образом, чтобы достичь толщины пленки, получаемой за каждую реакционную серию, равной 0,9...1 нм. Для сравнительного анализа была также выращена пленка бинарного оксида HfO_2 толщиной 5,5 нм с использованием только циклов $Hf[N(CH_3)(C_2H_5)]_4$ — H_2O. В данном случае число реакционных циклов было равно 50.

Анализ структурных свойств пленок методами рентгеновской дифрактометрии (РД) и рентгеновской рефлектометрии (РР) был выполнен в геометрии Брэгга—Брентано на дифрактометре ARL X'TRA (Thermo Fisher Scientific), оснащенном рентгеновской Cu-трубкой.

Исследование химического состояния пленок $Hf_xAl_{1-x}O_y$ осуществлялось перед напылением верхних электродов методом *ex situ* рентгено-фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) на спектрометре Theta Probe Thermo Fisher Scientific с использованием рентгеновского источника Al K_α (1486 эВ) с энергетическим разрешением 0,8 эВ на линии Au4f в вакууме 10^{-7} Па. Сдвиг шкалы энергий связи устанавливался по пику Pt4f (71,01 эВ). Для неразрушающего анализа профиля пленок $Hf_xAl_{1-x}O_y$ по глубине был использован метод моделирования данных РФЭС с угловым разрешением [8, 9].

Исследование морфологии поверхности пленок и измерение шероховатости проводили полуконтактным методом с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) NT-MDT Solver Pro-M.

Напыление пленок Pt (толщина 50 нм) осуществлялось методом электронно-лучевого напыления, а напыление пленок TiN (толщина 50 нм) — методом реактивного магнетронного напыления. Нижние электроды напылялись сплошным слоем на

Рецепт атомно-слоевого осаждения пленки $Hf_xAl_{1-x}O_y$ с переменной концентрацией Al по глубине пленки

<table>
<tr><th>Образец</th><th>Нижний электрод</th><th>Диэлектрический слой $Hf_xAl_{1-x}O_y$</th><th>Верхний электрод</th></tr>
<tr><td>1</td><td>TiN</td><td><table>
<tr><td>Серия</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td></tr>
<tr><td>$n:m$</td><td>4:1</td><td>2:1</td><td>1:1</td><td>1:2</td><td>1:5</td><td>1:9</td></tr>
<tr><td>k</td><td>2</td><td>4</td><td>5</td><td>4</td><td>2</td><td>1</td></tr>
<tr><td>x</td><td>0,88</td><td>0,80</td><td>0,66</td><td>0,50</td><td>0,28</td><td>0,18</td></tr>
</table></td><td>Pt</td></tr>
<tr><td>2</td><td>Pt</td><td><table>
<tr><td>Серия</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td></tr>
<tr><td>$n:m$</td><td>1:9</td><td>1:5</td><td>1:2</td><td>1:1</td><td>2:1</td><td>4:1</td></tr>
<tr><td>k</td><td>1</td><td>2</td><td>4</td><td>5</td><td>4</td><td>2</td></tr>
<tr><td>x</td><td>0,18</td><td>0,28</td><td>0,50</td><td>0,66</td><td>0,80</td><td>0,88</td></tr>
</table></td><td>TiN</td></tr>
<tr><td>3</td><td>TiN</td><td>50 циклов HfO_2</td><td>Pt</td></tr>
</table>

кремниевые пластины, а верхние электроды — через теневую маску с диаметром отверстий 300 мкм. Перед напылением нижних электродов кремниевые пластины предварительно очищались в однопроцентном водном растворе HF. Таким образом, МДМ-структуры были получены напылением верхнего электрода из Pt в случае нижнего электрода из TiN (образец 1 TiN/$Hf_xAl_{1-x}O_y$/Pt) и верхнего электрода из TiN в случае нижнего электрода из Pt (образец 2 Pt/$Hf_xAl_{1-x}O_y$/TiN).

Функциональные свойства МДМ-структур были охарактеризованы с помощью вольт-амперных характеристик. Характер деградации функциональных свойств структур был исследован при импульсных переключениях сопротивления структур. Измерения квазистатических вольт-амперных характеристик и импульсные измерения осуществляли при комнатных условиях с помощью зондовой станции и характериографа Agilent B1500A. При электрических измерениях напряжение было приложено к TiN электроду, при этом Pt электрод был заземлен.

Результаты и их обсуждение

Исследования методом рентгеновской дифракции показали, что полученные методом АСО пленки $Hf_xAl_{1-x}O_y$ с переменным составом обладают аморфной структурой. Аморфная структура пленок, по-видимому, обусловливает их низкую шероховатость. Так, исследования методом АСМ показали, что среднеквадратическая шероховатость $Hf_xAl_{1-x}O_y$ пленок, выращенных на подслое Pt, составляет ~0,4 нм для кадра сканирования со стороной 5 мкм, что практически совпадает с шероховатостью исходной поверхности платины.

На рис. 1 представлены результаты неразрушающего профилирования по глубине с использованием методики РФЭС с угловым разрешением для пленки $Hf_xAl_{1-x}O_y$ (образец 2), выращенной методом АСО на подслое Pt. Данные РФЭС указывают на наличие тонкого (~1...1,5 нм) слоя загрязнений, содержащих углерод и кислород, на поверхности образцов. Под слоем поверхностных загрязнений наблюдаются профили распределения металлов по глубине (Al и Hf), демонстрирующие переменную концентрацию Al и Hf по глубине АСО пленки $Hf_xAl_{1-x}O_y$. Так, содержание Al уменьшается от $x = 0,3$ (нормировано на данные,

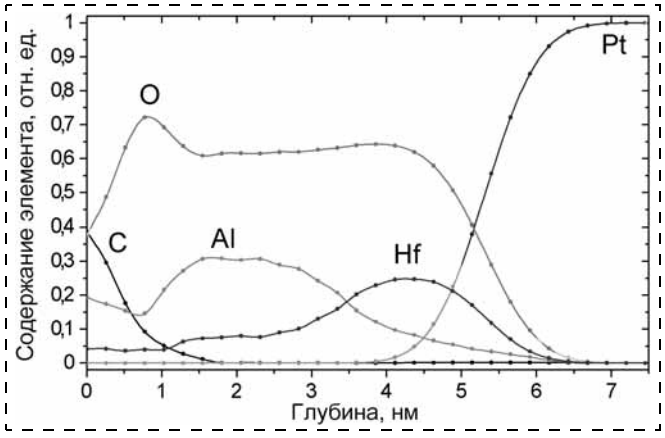

Рис. 1. Неразрушающее профилирование по глубине с использованием методики РФЭС с угловым разрешением для пленки $Hf_xAl_{1-x}O_y$, выращенной методом АСО на подслое Pt (образец 2)

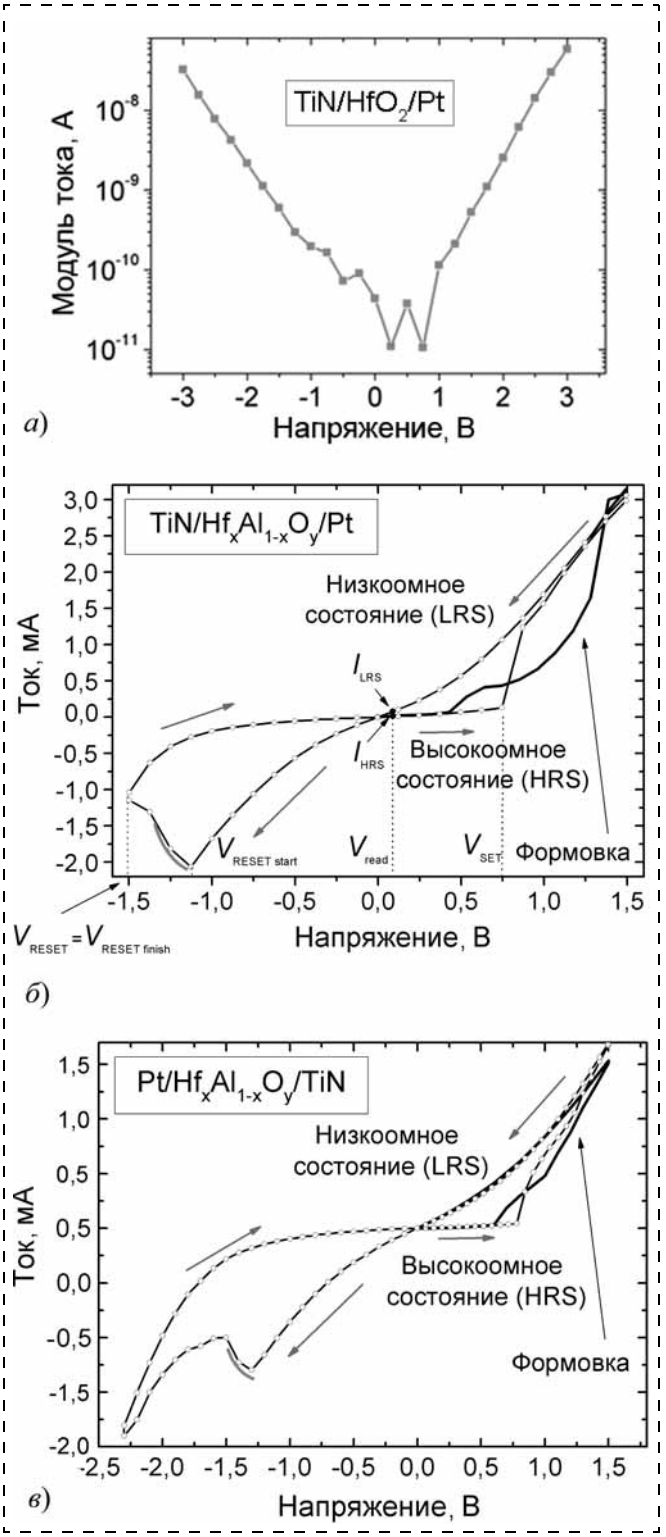

Рис. 2. Вольт-амперные характеристики МДМ-структур TiN/HfO_2/Pt (*а*), TiN/$Hf_xAl_{1-x}O_y$/Pt (*б*) и Pt/$Hf_xAl_{1-x}O_y$/TiN (*в*)

полученные на металлическом Al-образце) на поверхности диэлектрической пленки до $x = 0{,}05$ на границе с Pt нижним электродом. При этом содержание Hf увеличивается по направлению в глубину пленки $Hf_xAl_{1-x}O_y$. Стехиометрия бинарных оксидов HfO_2 и Al_2O_3 позволяет сделать вывод, что в смешанном оксиде $Hf_xAl_{1-x}O_y$ содержание кислорода должно увеличиваться с увеличением содержания Hf, т. е. по направлению в глубину пленки. Действительно, экспериментально установлено, что содержание кислорода увеличивается от $y = 0{,}62$ на поверхности диэлектрической пленки до $y = 0{,}65$ на границе с Pt нижним электродом.

Измеренные профили Hf, Al и O соответствуют расчетам, основанным на подходе, описанном в работе [10], для определения стехиометрии смешанного АСО оксида с учетом скорости АСО и плотностей компонентов оксида. Для диэлектрика $Hf_xAl_{1-x}O_y$, выращенного на подслое TiN, наблюдаются аналогичные профили содержания компонентов оксида с максимальным содержанием Al на границе раздела $TiN/Hf_xAl_{1-x}O_y$ (образец 1, профили не показаны).

Квазистатические вольт-амперные характеристики МДМ-структур $TiN/Hf_xAl_{1-x}O_y/Pt$, $Pt/Hf_xAl_{1-x}O_y/TiN$, $TiN/HfO_2/Pt$ представлены на рис. 2. Контрольная структура на основе чистого оксида гафния $TiN/HfO_2/Pt$ (образец 3) не демонстрирует эффекта резистивного переключения в диапазоне напряжений −3 В...3 В (рис. 2, *а*). При этом туннельный ток не превышает $3 \cdot 10^{-8}$ А при $V = -3$ В. МДМ-структуры для проявления эффекта резистивного переключения требуют достаточно мягкой формовки (сплошные линии на рис. 2, *б* и *в*). Процесс формовки происходит в диапазоне напряжений 0,45 В...1,3 В для $TiN/Hf_xAl_{1-x}O_y/Pt$ и 0,65 В...1,5 В для $Pt/Hf_xAl_{1-x}O_y/TiN$. Типичная вольт-амперная характеристика для последующих циклов резистивных переключений (линии из кружков на рис. 2, *б* и *в*) говорит о том, что переключение между высокоомным (high resistance state — HRS) и низкоомным (low resistance state — LRS) состояниями, называемое включением (SET), состоит из двух процессов, проявляющихся в скачкообразной и плавной зависимости тока от приложенного напряжения. Скачкообразное включение происходит при $V_{SET} = 0{,}75$ В для $TiN/Hf_xAl_{1-x}O_y/Pt$ и $Pt/Hf_xAl_{1-x}O_y/TiN$. Обратное переключение (выключение — RESET) между состояниями LRS и HRS в обоих случаях носит плавный характер, причем для МДМ-структуры $TiN/Hf_xAl_{1-x}O_y/Pt$ выключение происходит при изменении напряжения в диапазоне от −1,1 В до $V_{RESET} = -1{,}5$ В, а для $Pt/Hf_xAl_{1-x}O_y/TiN$ — в диапазоне от −1,3 В до $V_{RESET} = -2{,}3$ В. Таким образом, полное выключение происходит за 0,4 В для $TiN/Hf_xAl_{1-x}O_y/Pt$ и за 1 В для $Pt/Hf_xAl_{1-x}O_y/TiN$. Измеренное при напряжении чтения $V_{read} = 0{,}2$ В отношение сопротивлений в высокоомном и низкоомном состояниях R_{HRS}/R_{LRS} лежит в пределах 7...10. Типичное значение тока составляет $I_{HRS} \approx 10$ мкА для высокоомного состояния и $I_{LRS} \approx 100$ мкА для низкоомного состояния.

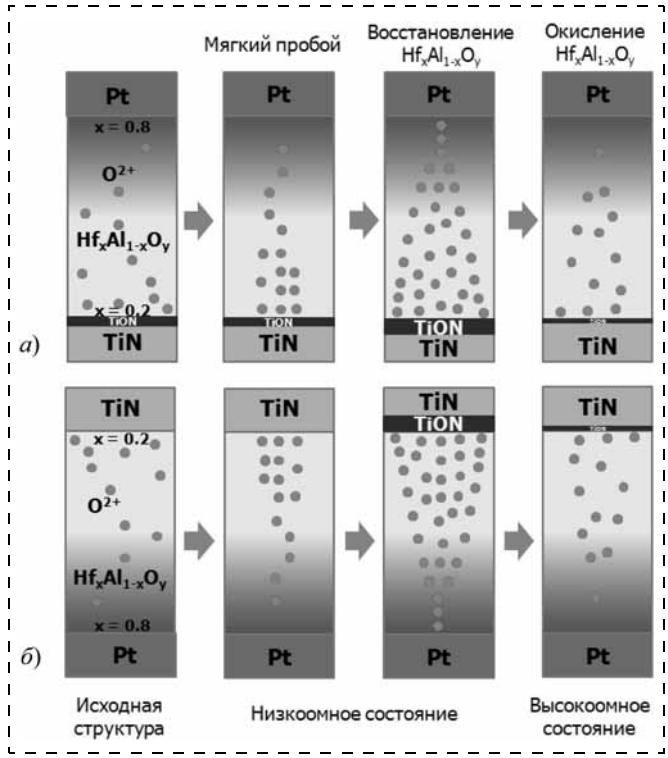

Рис. 3. Схема процессов резистивного переключения в МДМ-структурах $TiN/Hf_xAl_{1-x}O_y/Pt$ (*а*) и $Pt/Hf_xAl_{1-x}O_y/TiN$ (*б*)

Таким образом, вольт-амперные характеристики (ВАХ) полного цикла резистивного переключения МДМ-структур $TiN/Hf_xAl_{1-x}O_y/Pt$ и $Pt/Hf_xAl_{1-x}O_y/TiN$ качественно и количественно похожи. На прямой ветви ВАХ скачкообразный этап включения соответствует процессу "мягкого" (обратимого) пробоя диэлектрической пленки $Hf_xAl_{1-x}O_y$ в слое, прилегающем к TiN-электроду (см. рис. 3, *а* и *б*). В данном слое содержание Al наибольшее и, соответственно, наименьшая диэлектрическая проницаемость [11] и одновременно наибольшее число вакансий кислорода, поэтому вероятность "мягкого" пробоя наиболее велика. "Мягкий" пробой приводит к образованию токопроводящего канала, состоящего из вакансий кислорода, в соответствующем слое диэлектрика $Hf_xAl_{1-x}O_y$ (см. рис. 3, *а* и *б*). Плавный этап включения соответствует процессу расширения токопроводящего канала в соответствии с профилем содержания Al в оксидном слое $Hf_xAl_{1-x}O_y$ за счет диффузии кислорода к слою TiN и формированию на границе раздела $TiN/Hf_1Al_{1-x}O_y$ слоя TiON некоторой толщины. Это приводит к частичному восстановлению оксида $Hf_xAl_{1-x}O_y$, сопровождающемуся генерацией и диффузией вакансий ки-

слорода в оксидном слое. Положительно заряженные вакансии кислорода, расположенные в диэлектрическом слое, являются ловушками для электронов, поэтому механизм токопереноса в канале, образованном вакансиями кислорода, связан с туннелированием электронов через ловушки [2].

В отличие от большинства активных по отношению к кислороду металлов (таких как Ti, Zr) нитрид титана TiN способен обратимым образом поглощать и высвобождать ионы кислорода [12], поэтому структуры для ReRAM с TiN электродом обладают хорошо воспроизводимым эффектом резистивного переключения. Pt электрод в данном случае обеспечивает инертную границу с диэлектриком.

Основное отличие ВАХ МДМ-структур $TiN/Hf_xAl_{1-x}O_y/Pt$ и $Pt/Hf_xAl_{1-x}O_y/TiN$ заключается в форме участка ВАХ, соответствующего выключению. Часть участка, выделенная на рис. 2, *а* и *б,* похожа для обеих структур, а при больших напряжениях ВАХ, соответствующие выключению, существенно различаются. Природа процесса выключения заключается в восстановлении ранее образовавшегося оксинитрида титана TiON на границе раздела $TiN/Hf_xAl_{1-x}O_y$ и, соответственно, окислении слоя $Hf_xAl_{1-x}O_y$. Эти процессы сопровождаются обратной миграцией ионов кислорода в $Hf_xAl_{1-x}O_y$ и, соответственно, рассасыванием токопроводящего канала из вакансий кислорода, что сопровождается увеличением сопротивления МДМ-структуры. Принципиальным отличием структуры с нижним электродом TiN является наличие собственного слоя оксинитрида титана TiON, который образуется при транспортировке на воздухе пластины с напыленным TiN в камеру реактора АСО. В противоположном случае, когда TiN наносится поверх пленки АСО диэлектрика, на воздухе транспортируется образец с инертной Pt и затем с полностью окисленной пленкой $Hf_xAl_{1-x}O_y$. Наличие собственного слоя

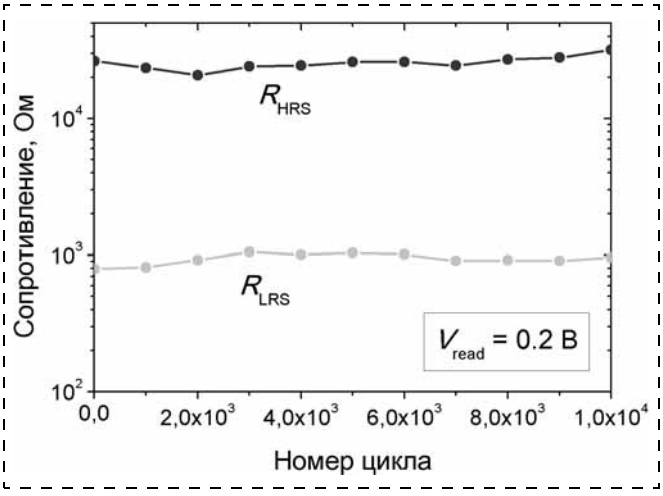

Рис. 4. Результаты теста на деградацию для МДМ-структуры $Pt/Hf_xAl_{1-x}O_y/TiN$ при импульсных измерениях

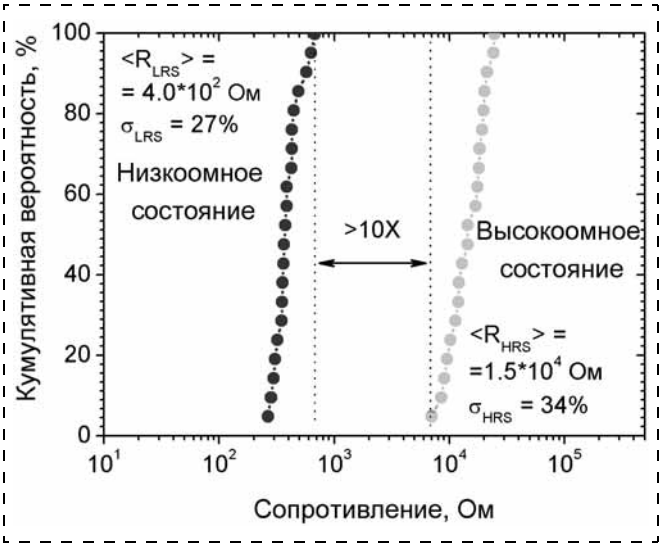

Рис. 5. Статистическое распределения сопротивлений в высокоомном и низкоомном состояниях для МДМ-структуры $Pt/Hf_xAl_{1-x}O_y/TiN$ (образец 2), измеренных при V_{read} = 0,2 В в течение 10^4 циклов резистивного переключения. Здесь $\langle R_{HRS} \rangle$ и $\langle R_{LRS} \rangle$ — средние значения сопротивления в высокоомном и низкоомном состояниях соответственно, σ_{HRS} и σ_{LRS} — среднеквадратичные отклонения сопротивления в высокоомном и низкоомном состояниях соответственно, поделенные на среднее значение

TiON еще до воздействия электрического поля приводит к тому, что рассасывание канала из вакансий кислорода в структуре $TiN/Hf_xAl_{1-x}O_y/Pt$ в процессе выключения происходит более эффективно по сравнению со структурой $Pt/Hf_xAl_{1-x}O_y/TiN$.

Тесты на деградацию функциональных свойств для МДМ-структур $TiN/Hf_xAl_{1-x}O_y/Pt$ и $Pt/Hf_xAl_{1-x}O_y/TiN$ проводились в импульсном режиме. Длительность импульсов напряжения составляла 1 мкс, амплитуда импульсов была равной V_{SET} и V_{RESET} для акта включения и выключения соответственно. Считывание текущего значения тока осуществлялось при V_{read} = 0,2 В. Данные по деградации сопротивлений в высокоомном и низкоомном состояниях для МДМ-структур $TiN/Hf_xAl_{1-x}O_y/Pt$ и $Pt/Hf_xAl_{1-x}O_y/TiN$ получены для 10^4 циклов резистивного переключения, на протяжении которых не наблюдается существенных изменений сопротивления. На рис. 4 представлены результаты теста на деградацию для структуры $Pt/Hf_xAl_{1-x}O_y/TiN$. Кроме того, данные МДМ-структуры обладают хорошей однородностью сопротивлений в высокоомном и низкоомном состояниях (рис. 5). Кумулятивная вероятность для сопротивления (относительное отклонение сопротивления, определенное как отношение среднеквадратичного отклонения к среднему значению) в высокоомном состоянии составляет 34 %, в низкоомном состоянии — 27 %, что соответствует данным для $Hf_xAl_{1-x}O_y$ диэлектриков, выращенных другими методами [13].

Заключение

Для создания тонких пленок трехкомпонентного оксида $Hf_xAl_{1-x}O_y$ с переменным (по глубине) содержанием Al был использован метод атомно-слоевого осаждения с чередованием реакционных циклов осаждения HfO_2 и Al_2O_3. В качестве подложек были использованы пленки Pt и TiN. Результаты РФЭС позволили заключить, что содержание Al изменяется по глубине от $x = 0{,}3$ до $x = 0{,}05$ для структуры $Pt/Hf_xAl_{1-x}O_y$ и от $x = 0{,}05$ до $x = 0{,}3$ для структуры $TiN/Hf_xAl_{1-x}O_y$, в которой градиент содержания Al по глубине противоположный. Эффект резистивного переключения был исследован для МДМ-структур $TiN/Hf_xAl_{1-x}O_y/Pt$ и $Pt/Hf_xAl_{1-x}O_y/TiN$. Было обнаружено, что данные структуры обладают похожими параметрами переключения, в частности, значениями напряжения включения и выключения, сопротивления в низкоомном и высокоомном состояниях. Кроме того, оба типа структур демонстрируют высокую долговечность использования — число циклов записи-перезаписи составляет не менее 10^4. Единственное отличие электрофизических свойств МДМ-структур заключается в различной форме обратной ветви петли полного цикла резистивного переключения, что объясняется наличием собственного слоя TiON в МДМ-структуре $TiN/Hf_xAl_{1-x}O_y/Pt$.

Научные исследования проводились при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках реализации федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009—2013 годы (Соглашение № 14.A18.21.1854 от 04 октября 2012 г.) с использованием оборудования Центра коллективного пользования МФТИ (ГК№ 16.552.11.7022).

Список литературы

1. **International** Technology Roadmap of semiconductors. Редакция 2011 г. URL: http://www.itrs.net/.

2. **Yu Sh., Guan X., Wong H.-S. Ph.** Conduction mechanism of $TiN/HfO_x/Pt$ resistive switching memory: A trap-assisted-tunneling model // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 99. P. 063507.

3. **Kim D. C., Seo S., Ahn S. E.** et al. Electrical observations of filamentary conductions for the resistive memory switching in NiO films // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 88. P. 202102.

4. **Strukov D. B., Snider G. S., Stewart D. R., Williams R. S.** The missing memristor found // Nature. 2008. V. 453. P. 80—83.

5. **Dong R., Lee D. S., Xiang W. F.** et al. Reproducible hysteresis and resistive switching in metal-Cu_xO-metal heterostructures // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. P. 042107.

6. **Lee H. Y., Chen P. S., Wu T. Y.** et al. Low power and high speed bipolar switching with a thin reactive ti buffer layer in robust HfO_2 based RRAM // IEDM Tech. Dig. 2008. P. 297—300.

7. **Zhang H. W., Gao B., Yu S.** et al. Effect of ionic doping on the behaviors of oxygen vacancies in HfO_2 and ZrO_2: A first principles study // IEEE. 2009. P. 155.

8. **Livesey A. K., Smith G. C.** XPS quantitative evaluation of the overlayer/support intensity ratio in particulate systems // J. Electron Spectroscopy and Related Phenomena. 1994. V. 67. P. 439.

9. **Opila R. L., Eng J. J.** Thin films and interfaces in microelectronics: composition and chemistry as function of depth // Progress in Surface Science. 2002. V. 69. P. 125.

10. **Kil D.-S., Yeom S.-J., Hong K.** et al. Theoretical calculation and experimental verification of the Hf/Al concentration ratio in nano-mixed $Hf_xAl_yO_z$ films prepared by atomic layer deposition // J. Semiconductor Technology and Science. 2005. V. 5. P. 66.

11. **Алехин А. П., Григал И. П., Гудкова С. А., Лебединский Ю. Ю., Маркеев А. М., Чуприк А. А.** Атомно-слоевое осаждение трехкомпонентных диэлектриков $Hf_xAl_{1-x}O_y$ с высокой диэлектрической проницаемостью // Труды МФТИ. 2011. Т. 3. № 3. С. 22—29.

12. **Xu N., Gao B., Liu L. F., Sun B.** et al. A unified physical model of switching behavior in oxide-based RRAM // Proceedings of Symposium on VLSI Technology. 2008. P. 100—101.

13. **Yu S., Gao B., Dai H. B., Sun B.** et al. Improved uniformity of resistive switching behaviors in HfO_2 thin films with embedded Al layers // Electrochem. Solid State Lett. 2010. V. 13, N 2. P. H36—H38.

УДК 539.384.6

О. Е. Глухова, д-р физ.-мат. наук, зав. каф.,
Е. Л. Коссович, мл. науч. сотр.
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского",
e-mail: kossovichel@info.sgu.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КРАЕВЫХ ВОЛН В МНОГОСЛОЙНЫХ ГРАФЕНОВЫХ ПЛАСТИНАХ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВИДА УКЛАДКИ СЛОЕВ

Поступила в редакцию 11.09.2012

Исследован прогиб многослойной графеновой пластины в рамках теории сплошной среды. Рассмотрено три вида укладки слоев (ориентации гексагональных элементов атомной сетки монослоя графена) — типов AAA, ABA, ABC. Для каждого из таких материалов были вычислены плотности. Также в работе были использованы явные модели, описывающие распространение изгибной краевой волны Коненкова в многослойных графеновых пластинах, модифицированные под указанные выше случаи. Можно сделать вывод, что наиболее прочными оказываются пластины из многослойного графена с типом укладки слоев ABC.

Ключевые слова: *краевая изгибная волна, многослойный графен, типы укладки слоев AAA, ABA, ABC, плотность, тонкая упругая пластина, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, изгибная жесткость, теория изгиба тонких пластин Кирхгофа, квантово-химический метод Харрисона*

Введение

Известно, что графен обладает рядом уникальных свойств, среди которых в настоящее время следует отметить его легкость, эластичность и прочность, обусловленные отсутствием негексагональных элементов в его атомной сетке. Данные свойства позволяют использовать графен как составляющую часть многих композитных материалов [1—5]. Одним из факторов, негативно влияющих на прочность конструкций из тонких пластин (изготовленных из металлов, а также композитов и графена), является возникновение и распространение локализованных волн (поверхностных волн Рэлея и краевых изгибных волн Коненкова, а также их аналогов) [6—10]. Изучение свойств изгибных краевых волн получило свое распространение сравнительно недавно, однако установлено, что ввиду их дисперсионного свойства они могут приводить к разрушению пластин (в особенности вблизи краев) [11]. Также известно, что краевая волна Коненкова чувствительна к толщине пластины [12].

Для изучения распространения краевых волн в многослойных графеновых пластинах требуется построение их модели в рамках теории сплошной среды. Известно, что для однослойного графена построение модели тонкой пластины не представляется возможным в силу малости толщины его атомного каркаса, а также поведения на подложке (подобно мембране, но с начальным поверхностным натяжением). Однако было показано, что многослойный графен, состоящий из 13—15 слоев, не деформируется на подложке [13].

Исследование возникновения краевых волн в тонких упругих пластинах является нетривиальной задачей, так как известно, что изгибная краевая волна (волна Коненкова и ее аналоги для различных типов материалов) является так называемой скрытой волной. Ее скрытость заключается в том, что скорость волны не входит явно в уравнение движения для прогиба пластины в рамках теории Кирхгофа, а неявным образом заключена в уравнения краевых условий, и выявление наличия такой волны требует значительных вычислительных навыков. Однако в настоящий момент авторами данной работы построены явные модели распространения краевых волн в тонких упругих пластинах [14, 15]. Применение подобных моделей позволяет значительно упростить определение параметров распространения такой волны [14].

Таким образом, целью данной работы является исследование распространения волны Коненкова в тонких многослойных графеновых пластинах в рамках модели теории сплошной среды, а также спецификация уже построенных моделей для данного материала. Планируется модификация моделей с учетом многослойной структуры материала такая, чтобы было возможно их использование для известного числа слоев в пластине, а также для учета способа укладки слоев. В рамках проводимого исследования нами будут изучены свойства графена в рамках теории сплошной среды, а именно, будут ли свойства монослоя графена изотропными или ортотропными при сравнительно больших линейных размерах последнего.

1. Квантово-механическое исследование механических свойств графена

Моделирование графена в рамках теории сплошной среды требует точного знания его механических свойств. В настоящее время в литературе графен представляется и как изотропный, и как ортотропный материал. При этом обе модели равноценно принимаются различными авторами, и ведутся жаркие споры о том, какая из них наиболее применима в тех или иных случаях. Теоретические и экспериментальные исследования проводят с точки

зрения уже принятой авторами модели материальных свойств графена, и для нее определяют основополагающие механические параметры, например, для изотропной модели это коэффициент Пуассона и модуль Юнга. В качестве примера использования изотропной теории структуры графена можно привести следующие работы: в работах [16, 17] авторы определяют значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона исходя из классического и модифицированного методов Бреннера молекулярной динамики [18, 19]; метод *ab initio*, использованный авторами работы [20], дает несколько другие значения модуля Юнга. Наконец, было установлено, что в рамках классической изотропной теории сплошной среды модуль Юнга графена равен 1,1 ТПа [5] для случая больших размеров листа.

Теория ортотропии (как частного случая анизотропии) графена появилась при изучении формы гексагональных элементов атомной структуры материала. В случае ортотропной теории материальных параметров становится значительно больше и в основном их определяют, исходя из размерной теории свойств графена, которая заключается в том, что его свойства меняются в зависимости от линейных размеров конкретного образца. Моделирование графеновых пластин как ортотропных было приведено во многих статьях, например [21—24]. Определение упругих параметров для ортотропного графена — более трудоемкое занятие по сравнению с нахождением констант для изотропной модели, поэтому статей с исследованиями на эту тему на данный момент сравнительно мало. Среди подобных работ можно выделить работу [25], в которой показано, что различие между направлениями деформирования графенового листа значительное и превышает значение 1,1 ТПа в полтора раза и выше. Также за последние несколько лет появились работы, опровергающие ортотропную теорию графена при малых деформациях последнего. К таким работам можно отнести, например [26], где показано, что при экспериментальном молекулярно-механическом моделировании растяжения графеновых листов модули Юнга и коэффициенты Пуассона в зигзаг и кресельном направлениях одинаковы или незначительно различаются (что может быть вызвано лишь погрешностями численного эксперимента). Авторы работы [26], применяя теорию балок к связям между атомами углерода в гексагоне атомной решетки графена, а также численным методом с помощью конечно-элементного пакета ANSYS показали, что в продольном и поперечном направлениях графен имеет одинаковые модули Юнга (значение, равное 1,04 ТПа, полученное с помощью аналитических выкладок, и значения 1,14 и 1,09 ТПа, определенные численным решением методом конечных элементов).

В целях определения правильности той или иной теории для свойств графенового листа при его сравнительно больших линейных размерах авторами было проведено квантово-механическое *ab initio* исследование поведения различных квадратных листов графена и по результатам были найдены их механические свойства. В качестве расчетного метода применяли квантовый метод Харрисона [27]. Способ нахождения модулей Юнга был продемонстрирован в работе [28] и успешно применен для определения таких констант для углеродных нанотрубок различных диаметров и длин. Метод зарекомендовал себя как достаточно точный и дающий результаты, чрезвычайно близкие к экспериментальным.

Ниже приведена таблица со сравнительными характеристиками линейных размеров исследованных графеновых листов, а также найденными их механическими свойствами.

Сравнительные характеристики исследованных листов графена

Длина, Å	Ширина, Å	Модуль Юнга, (зигзаг), ТПа	Модуль Юнга кресельное направление, ТПа
11,462	7,206	0,736	0,890
11,405	17,086	0,701	1,002
11,411	14,599	0,804	0,747
11,426	12,135	0,780	0,758
11,444	9,672	0,733	0,784
15,696	17,075	0,855	0,894
15,713	14,604	0,769	0,828
15,731	12,141	0,723	0,892
15,762	9,673	0,747	0,815
15,805	7,201	0,812	0,792
20,008	14,60	0,695	0,794
20,035	17,04	0,981	0,841
20,036	12,14	0,692	0,873
20,088	9,668	0,809	0,737
20,130	7,203	0,731	0,821
24,317	17,067	0,848	0,800
24,329	14,611	0,745	0,908
24,364	12,134	0,820	0,802
24,390	9,673	0,684	0,813
24,492	7,203	0,921	0,785
28,608	17,068	0,792	0,802
28,642	14,593	0,813	0,701
28,690	9,673	0,588	0,811
28,708	12,116	0,837	0,661
28,804	7,204	0,767	0,825
54,030	49,861	0,831	0,823
71,229	71,268	0,893	0,886

Из материала таблицы можно сделать следующие выводы.

1. Результаты, полученные для модулей Юнга графеновых листов, действительно зависят от размера последних, однако зависимость незначительна.

2. Видно, что значения вышеуказанной константы зависят не только от размеров листов, но также от соотношения сторон. В случае, когда соотношение сторон приближается к значению 1:1, значения модулей Юнга по обоим направлениям становятся практически одинаковыми.

3. При увеличении длин сторон для квадратных графеновых листов модули Юнга увеличиваются, сохраняя свои свойства, и приближаются к значению 0,9 ТПа.

Следует также отметить, что максимальный лист, который был рассчитан нами, составлял длину и ширину около 72 Å. Однако исследователями ранее были рассчитаны модули Юнга для более протяженных структур, и найденное значение соответствовало 1,1 ТПа. Таким образом, можно сделать вывод о том, что графеновые листы макроразмеров, т. е. таких размеров, когда соотношениями сторон уже можно пренебречь, ведут себя как изотропный материал с модулем Юнга, равным 1,1 ТПа. Параметры $E = 1{,}1$ ТПа [5] и $\nu = 0{,}33$ [29] (коэффициент Пуассона) будут использованы в дальнейшем в качестве основополагающих величин, характеризующих многослойный графен в рамках теории Кирхгофа изгиба тонких пластин.

2. Модели многослойного графена

Различают три способа укладки слоев в многослойном графене. Они представлены на рис. 1. Тип AAA характеризуется такой ориентацией гексагональных элементов в графене, что соответствующие атомы находятся строго друг над другом (рис. 1, *а*). Показано, что тип AAA является наименее стабильным и энергетически выгодным способом укладки слоев в графене [30]. Тип ABA, или тип Бернала [30], характеризуется смещением центрального слоя (если рассматривать три слоя, лежащих друг над другом) относительно двух крайних, как показано на рис. 1, *б*. Ромбоэдрический, или тип ABC [30], характеризуется еще более сложным смещением гексагональных элементов, и периодичность повторения такой схемы уже составляет три слоя (рис. 1, *в*).

Как видно из сравнения рис. 1, *а*, *б*, *в*, в каждом рассматриваемом случае плотность такого листа будет меняться. Мы рассчитали плотность многослойного графенового листа по следующей схеме. Рассматривали образец из n слоев графена. На нижнем слое выделяли треугольник, содержащий один атом и соединяющий центры трех соседних гексагонов, как показано на рис. 2. Далее на основе

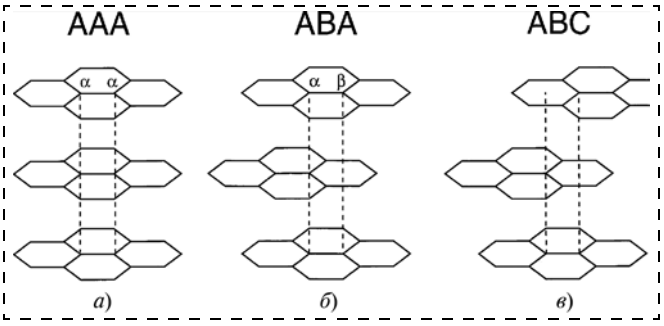

Рис. 1. Ориентация гексагональных элементов в многослойном графене в зависимости от типа укладки слоев

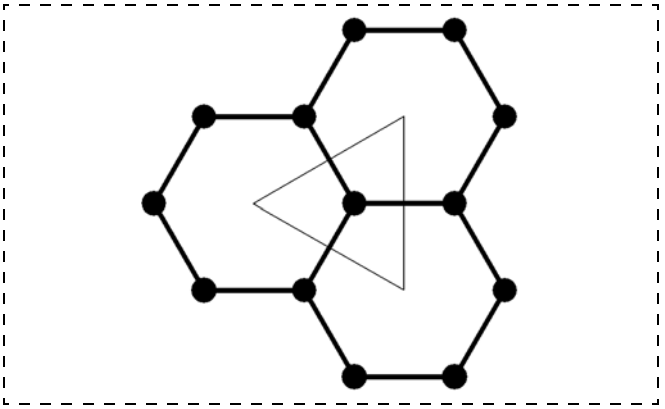

Рис. 2. Схема выделения области

этого треугольника была построена призма. Ее высота рассчитывали по формуле

$$2h = (n - 1)r_0 + 2 \cdot 1{,}7, \qquad (1)$$

где n — число слоев; r_0 — межслойное расстояние, различное для каждого типа упаковки; 1,7 Å — это равновесное ван дер Ваальсово расстояние между атомами углерода. Площадь указанного треугольника постоянна и равна $3\sqrt{3}/8 \cdot 1{,}42^2$ Å^2.

Известно, что межслойное расстояние r для типа AAA равно 3,4 Å, для типа ABA $r = 3{,}335$ Å, а для типа ABC $r = 3{,}35$ Å [30]. Тогда с учетом данных значений и массы одного атома углерода, равной 12 а. е. м., были получены следующие значения плотности для каждого из способов укладки слоев: AAA — 2238,4 кг/м^3, ABA — 2282,2 кг/м^3, ABC — 3408,1 кг/м^3.

3. Явные модели распространения краевых волн в многослойном графене с учетом типов ориентации слоев друг относительно друга

Краевая волна Коненкова в тонкой изотропной пластине. Рассмотрим тонкую полубесконечную упругую пластину из изотропного материала, занимающую в декартовых координатах (x, y, z) область $-\infty < x < \infty$, $0 \leqslant y < \infty$ и $-h \leqslant z \leqslant h$, как показано на рис. 3. Толщина пластины $2h$ рассчитывается по формуле (1), где n — число слоев многослойного графена. В рамках классической теории Кирхгофа [31] уравнение движения для вертикального прогиба пластины записывается в виде:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + \frac{2h\rho}{D}\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0, \qquad (2)$$

где w — искомый прогиб пластины; t — временная координата; ρ — плотность графена; $D = 2Eh^3/3(1 - \nu^2)$ —

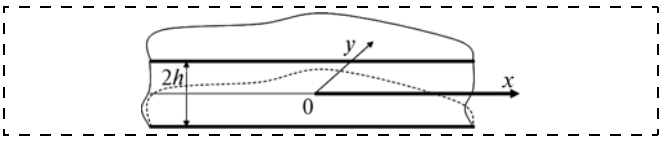

Рис. 3. Полубесконечная пластина. Ориентация осей координат

изгибная жесткость. Здесь значение модуля Юнга графена $E = 1{,}1$ ТПа [5], а коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}33$ [29].

Рассмотрим случай, когда свободный край графеновой пластины не загружен внешними силами. Тогда граничные условия при $y = 0$ записываются следующей системой:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0, \qquad \frac{\partial^3 w}{\partial y^3} + (2 - \nu) \frac{\partial^3 w}{\partial y \partial x^2}. \qquad (3)$$

Решение задачи будем искать в виде $w = W(x, y)\mathbf{e}^{-i\omega t}$, где ω — некоторая частота гармонических колебаний пластины (собственных или вынужденных). Тогда задачу можно решать для амплитудных значений прогиба и отделить временную переменную. Перепишем задачу (2)—(3) в следующих параметрах:

$$\xi = \frac{x}{h}; \ \eta = \frac{y}{h}; \ W^* = \frac{W}{h}, \qquad (4)$$

и применим интегральное преобразование Фурье ($\xi \to ip$, где p — параметр преобразования Фурье, $W^* \to \hat{W}$). Интегральное преобразование Фурье будет использовано в дальнейшем при решении задач с неоднородными граничными условиями. В данном случае его применяем ради сохранения общности постановки краевой задачи для образов. Стоит также отметить, что символом "^" в данной работе мы обозначаем образы функций, подвергшихся интегральному преобразованию Фурье.

Уравнение движения (1) для образов примет вид:

$$\frac{d^4 \hat{W}}{d\eta^4} - 2p^2 \frac{d^2 \hat{W}}{d\eta^2} + \left(p^4 - \lambda_0^2\right) \hat{W} = 0, \qquad (5)$$

где $\lambda_0^2 = 3\rho h^2 \omega^2 (1 - \nu^2)/E$ — безразмерный частотный параметр. Граничные условия (3) будут иметь следующий вид ($\eta = 0$):

$$\frac{d^2 \hat{W}}{d\eta^2} - \nu p^2 \hat{W} = 0;$$

$$\frac{d^3 \hat{W}}{d\eta^3} - (2 - \nu) p^2 \hat{W} = 0. \qquad (6)$$

Решение данной задачи находим в следующей форме:

$$\hat{W} = A\mathbf{e}^{-\sqrt{p^2 - \lambda_0}\eta} + B\mathbf{e}^{-\sqrt{p^2 - \lambda_0}\eta}, \qquad (7)$$

где A и B — константы, подлежащие определению. Их находим из граничных условий (6), которые при подстановке в них (7) могут быть представлены в виде однородной системы линейных уравнений относительно неизвестных A и B. Очевидно, что однородная система линейных уравнений имеет ненулевые решения лишь в случае, когда ее определитель равен нулю. Таким образом, мы можем получить условие существования ненулевых решений полученной системы уравнений, а именно классическое уравнение для скорости волны Коненкова в виде

$$\frac{\left((2 - \nu)p^2 - \lambda_0\right)^2 \sqrt{p^2 + \lambda_0}}{\left((2 - \nu)p^2 + \lambda_0\right)^2 \sqrt{p^2 - \lambda_0}} = 1. \qquad (8)$$

Скорость волны Коненкова находим как действительное решение уравнения (8), имеющее следующую форму:

$$p_k = \sqrt{\lambda_0}/c_k, \qquad (9)$$

где c_k — коэффициент скорости волны Коненкова,

$$c_k = \left((1 - \nu)\left(3\nu - 1 + 2\sqrt{2\nu^2 - 2\nu + 1}\right)\right)^{1/4}. \qquad (10)$$

Графически зависимость (10) показана на рис. 4. Интервал для коэффициента Пуассона взят как $0{,}25 \leqslant \nu \leqslant 0{,}35$ [5, 32, 33, 34]. Следует также упомянуть, что уравнение (8) имеет еще один корень, обозначим его c_2, который имеет чисто комплексные значения, так как $c_2^4 < 0$ для любого значения коэффициента Пуассона. Поэтому в дальнейшем при его упоминании в данной статье мы всегда будем употреблять обозначение c_2^4.

Точное решение для прогиба пластины в зависимости от вида приложенной краевой нагрузки. Далее рассмотрим случай, когда пластина загружена изгибающим моментом на торце. Уравнение движения сохраняется в виде (2), а граничные условия запишем так:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = -M_0(x, t), \ \frac{\partial^3 w}{\partial y^3} + (2 - \nu) \frac{\partial^3 w}{\partial y \partial x^2} = 0. \ (11)$$

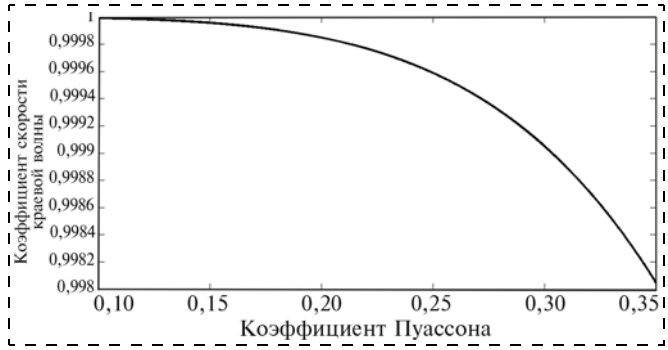

Рис. 4. Зависимость коэффициента скорости волны Коненкова от коэффициента Пуассона

Будем считать, что приложенный изгибающий момент имеет периодический характер $M_0(x, t) = M_0(x)\mathbf{e}^{-i\omega t}$. При использовании безразмерных параметров (4) и применении преобразования Фурье мы получим точное решение задачи (2)—(11) в терминах интегральных преобразований в виде:

$$\hat{W}(\eta, p) = \hat{M}_0 \frac{p^2}{p^4 - p_k^4} \times$$

$$\times \frac{-\left((1-\nu)p^2 - \lambda_0\right)\sqrt{p^2+\lambda_0}\,\mathbf{e}^{-\sqrt{p^2-\lambda_0}\eta} - }{c_k^2 c_2^2 \times} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{-\left((1-\nu)p^2 + \lambda_0\right)\right)\sqrt{p^2-\lambda_0}\,\mathbf{e}^{-\sqrt{p^2+\lambda_0}\eta}}{\times\left(\sqrt{p^2+\lambda_0} - \sqrt{p^2-\lambda_0}\right)\left(p_k^2 - p_2^2\right)} X(p_k); \quad (12)$$

где

$$p_2^4 = \frac{\lambda_0^2}{c_2^4},\ c_2^4 = (1-\nu)\left(3\nu - 1 - 2\sqrt{2\nu^2 - 2\nu + 1}\right); \quad (13)$$

$$X(p_k) = (1-\nu^2)p_k^4 - 2(1-\nu)\sqrt{p_k^4 - \lambda_0^2}\,p_k^2 - \lambda_0^2, \quad (14)$$

и $\hat{M}_0$ — безразмерный образ амплитуды $M_0(x)$ изгибающего момента, приложенного на торце пластины, после преобразования Фурье.

Аналогично задача ставится и решается для случая приложенной перерезывающей силы. Точное решение и модель здесь строят для угла поворота вокруг оси Ox: $\nu(x, y, t) = \frac{\partial w(x, y, t)}{\partial y}$. В терминах интегральных преобразований точное решение принимает вид

$$\hat{V}(\eta, p) = \hat{N}_0 \frac{p^2}{p^4 - p_k^4} \times$$

$$\times \frac{\left((1-\nu)p^2 + \lambda_0\right)\sqrt{p^2-\lambda_0}\,\mathbf{e}^{-\sqrt{p^2-\lambda_0}\eta} + }{c_k^2 c_2^2 \times} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{+\left((1-\nu)p^2 - \lambda_0\right)\sqrt{p^2+\lambda_0}\,\mathbf{e}^{-\sqrt{p^2+\lambda_0}\eta}}{\times\left(\sqrt{p^2+\lambda_0} - \sqrt{p^2-\lambda_0}\right)\left(p_k^2 - p_2^2\right)} X(p_k). \quad (15)$$

Методика построения явных моделей распространения краевой волны. Для построения явных моделей распространения краевых волн в многослойных графеновых пластинах примем следующие обозначения и предположения.

1. Толщина пластины в зависимости от способа упаковки слоев изменяется по закону (1), где для типа AAA r_0 = 3,4 Å; ABA r_0 = 3,335 Å, ABC r_0 = 3,35 Å.

2. Обозначим полутолщину h для каждого из типов укладки слоев: для AAA — h_1, ABA — h_2 и ABC — h_3.

3. Как было показано в разд. 2 данной работы, плотность материала также зависит от типа ориентирования слоев в многослойном графене. Примем

ρ_1 = 2238,8 кг/м^3 для типа AAA;

ρ_2 = 2282,2 кг/м^3 для типа ABA;

ρ_3 = 3408,1 кг/м^3 для типа ABC.

4. Таким образом, с учетом пп. 1 и 2 переобозначим безразмерную частотную постоянную λ_0^2 как:

$\lambda_1^2 = 3\rho h_1^2 \omega^2(1-\nu^2)/E$ — для типа AAA;

$\lambda_2^2 = 3\rho h_2^2 \omega^2(1-\nu^2)/E$ — для типа ABA;

$\lambda_3^2 = 3\rho h_3^2 \omega^2(1-\nu^2)/E$ — для типа ABC.

5. Явные модели для описания распространения краевой волны зависят от типа приложенной на торце нагрузки. Поэтому мы будем строить модели для случая приложенного изгибающего момента и для перерезывающей силы отдельно.

6. Известно, что вклад краевой изгибной волны Коненкова в общий профиль деформаций тонкой пластины связан с вкладом полюсов скорости волны Коненкова в точное решение задачи об изгибе. Используя асимптотическое приближение около полюсов Коненкова, можно построить модель распространения краевой волны в графеновой пластине.

В случае изгибающего момента, приложенного на крае, модель имеет следующий вид.

1. Одномерное параболическое уравнение для описания распространения волны вдоль свободного края пластины будет иметь следующий вид:

$$c_k^4 \frac{\partial^4 w_e}{\partial x^4} + \frac{3\rho_i(1-\nu^2)}{Eh_i^2}\frac{\partial^2 w_e}{\partial t^2} = Q_e^{(1)}\frac{\partial^2 M_0}{\partial x^2}, \quad (16)$$

где w_e — краевой прогиб пластины, ассоциируемый с краевой изгибной волной Коненкова, а коэффициент в правой части для первого типа приложенной нагрузки $Q_e^{(1)}$=

$$= \frac{\left((1-\nu)p^2 - \lambda_i\right)\sqrt{p^2+\lambda_i} - \left((1-\nu)p^2 + \lambda_i\right)\sqrt{p^2-\lambda_i}}{c_k^4 c_2^4\left(\sqrt{p^2+\lambda_i} - \sqrt{p^2-\lambda_i}\right)\left(p_k^4 - p_2^4\right)},$$

i = 1...3, в зависимости от типа приложенной нагрузки.

2. Двумерное эллиптическое уравнение для затухания волны вглубь пластины

$$\left(1 - c_k^4\right)\frac{\partial^4 w_{in}}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 w_{in}}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w_{in}}{\partial y^4} = 0. \qquad (17)$$

где w_{in} — прогиб внутренней части пластины, связанный с вкладом волны Коненкова;

с граничными условиями ($y = 0$)

$$w_{in}(x, 0) = w_e(x), \ \frac{\partial^2 w_{in}}{\partial y^2} = -\nu\frac{\partial^2 w_e}{\partial x^2}. \qquad (18)$$

В случае приложенной на торце перерезывающей силы модель строится для угла поворота вокруг оси Ox и имеет следующий вид.

1. Одномерное параболическое уравнение для описания распространения волны вдоль свободного края пластины:

$$c_k^4 \frac{\partial^4 \nu_e}{\partial x^4} + \frac{3\rho_i\left(1-\nu^2\right)}{Eh_i^2}\frac{\partial^2 \nu_e}{\partial t^2} = Q_e^{(2)}\frac{\partial^2 N_0}{\partial x^2}, \qquad (19)$$

где ν_e — краевой поворот пластины, связанный с краевой изгибной волной Коненкова, а коэффициент для второго типа внешнего краевого нагружения $Q_e^{(2)} =$

$$= \frac{-\left((1-\nu)p^2 + \lambda_i\right)\sqrt{p^2 - \lambda_i} + \left((1-\nu)p^2 - \lambda_i\right)\sqrt{p^2 + \lambda_i}}{c_k^4 c_2^4\left(\sqrt{p^2 + \lambda_i} - \sqrt{p^2 - \lambda_i}\right)\left(p_k^4 - p_2^4\right)},$$

$i = 1....3$ в зависимости от типа укладки слоев.

2. Двумерное эллиптическое уравнение для затухания волны вглубь пластины для прогиба ν_{in}, ассоциируемого с краевой изгибной волной Коненкова:

$$\left(1 - c_k^4\right)\frac{\partial^4 \nu_{in}}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 \nu_{in}}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \nu_{in}}{\partial y^4} = 0, \qquad (20)$$

с граничными условиями на торце пластины ($y = 0$)

$$\nu_{in}(x, 0) = \nu_e(x), \ \frac{\partial^2 \nu_{in}}{\partial y^2} = -(2 - \nu)\frac{\partial^2 \nu_e}{\partial x^2}. \qquad (21)$$

4. Прочностные свойства многослойного графена с точки зрения распространения краевой волны

Вначале проведем сравнение точного решения задачи и решения, полученного с помощью моделей, т. е. выделенный вклад краевой волны. Для этого будем считать, что момент, приложенный к краю пластины, изменяется по закону $M_0(x, t) = M_0\delta(x)\mathbf{e}^{-i\omega t}$, где $\delta(x)$ — дельта-функция Дирака, а величина безразмерного аналога коэффициента M_0 $\hat{M}_0 = \sqrt{2\pi}$. Также для анализа прочностных свойств графеновой пластины определим значение частотного параметра $\lambda_0 = 1$ (для дальнейшего сравнения) для любого числа слоев типа AAA. Для других типов это значение будет варьироваться. На рис. 5 представлено соотношение вклада краевой волны с точным решением при числе слоев, равном 15. Из рис. 5 видно, что вне окрестности приложения нагрузки краевая волна дает значительный вклад в точное решение задачи о прогибе. Таким образом, можно сделать вывод, что дальнейшее исследование прочностных свойств многослойной графеновой пластины можно проводить путем анализа решения уравнений построенной модели.

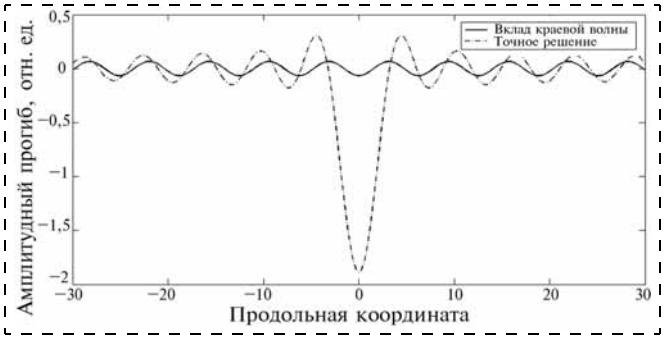

Рис. 5. Сравнение точного решения задачи о прогибе пластины и выделенного вклада краевой волны

Рис. 6 демонстрирует прогиб, вызванный возникшей краевой волной Коненкова, для всех трех способов укладки слоев.

Из рис. 6 видно, что амплитуда колебаний края графеновой многослойной пластины типа ABC значительно меньше таковой для двух других типов. Для более подробного исследования данного эффекта был построен график, представленный на рис. 7, — зависимость амплитуды прогиба от числа слоев многослойного графена.

Из приведенной зависимости видно, что при увеличении числа слоев, следовательно, при увеличении толщины пластины, ее прочностные свойства улучшаются. Однако тип ABC при мень-

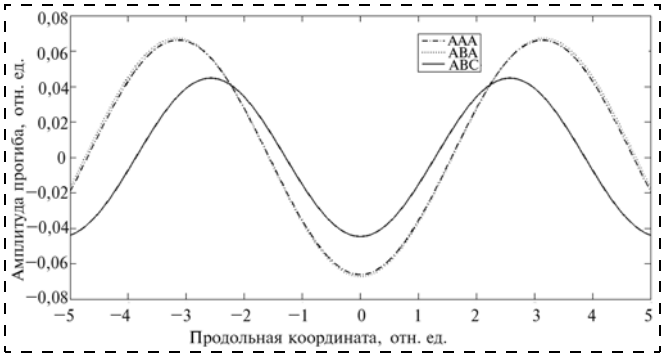

Рис. 6. Краевые колебания многослойной графеновой пластины при различных способах укладки слоев

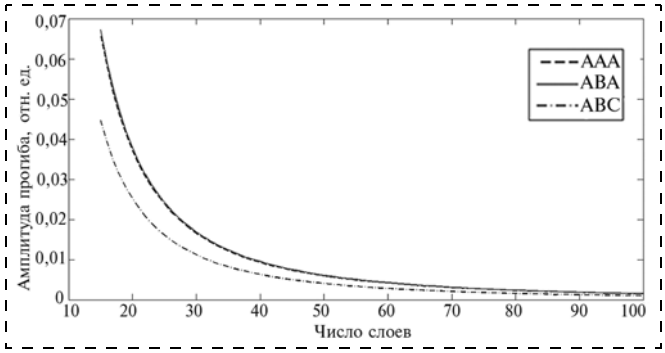

Рис. 7. Зависимость амплитуды колебаний от числа слоев при фиксированной частоте внешней нагрузки

шем числе слоев дает сравнительно более хорошие показатели прочности. Однако из рис. 7 видно, что при числе слоев более 80 различие между данными типами укладки слоев перестает быть значительным.

Результаты, полученные для случая приложенной на торце пластины перерезывающей силы, абсолютно аналогичны приведенным выше.

Заключение

В работе были исследованы механические свойства однослойного графена, а также многослойных графеновых пластин. Были получены следующие важные результаты.

1. С использованием квантово-химического метода Харрисона было показано, что при больших линейных размерах графенового листа механические свойства последнего слабо зависят от направления его деформирования. Таким образом, был сделан вывод об изотропии графенового листа.

2. При рассмотрении многослойного графена было выяснено, что плотность такого материала не зависит от числа слоев, однако значительно зависит от вида ориентации гексагональных элементов атомной решетки графена друг относительно друга в слоях. Так, для типа AAA $\rho_1 = 2238{,}8$ кг/м^3, для типа ABA $\rho_2 = 2282{,}2$ кг/м^3, для типа ABC $\rho_3 = 3408{,}1$ кг/м^3.

3. Показано, что прочностные свойства многослойной графеновой пластины меняются в зависимости от способа упаковки слоев. Наиболее прочными оказываются пластины при ромбоэдрическом (ABC) способе ориентации гексагональных элементов атомной решетки графенового монослоя при его упаковке в многослойную структуру.

Работа была выполнена в рамках Федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009—2013 годы, XLI очередь, мероприятие 1.2.1, технические науки, номер заявки в информационной компьютеризированной системе "2012-1.2.1-12-000-2013-064".

Список литературы

1. **Griffith A. A.** The phenomena of rupture and flow in solids // Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, 1921. Vol. 221. P. 163—198.

2. **Cowie J. M. G.** Polymers: Chemistry & Physics of Modern Materials // N. Y.: Blackie Academic, 1991.

3. **Geim A. K.** Graphene: status and prospects // Science. 2009. Vol. 324. P. 5934.

4. **Jiang J.-W., Wang J.-S., Li B.** Young's modulus of graphene: A molecular dynamics study // Physical Review Series B. 2009. Vol. 80. P. 113405.

5. **Lee C., Wei X., Kysar J. W.** et al. Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene // Science. 2008. Vol. 321. P. 385.

6. **Abrahams I. D., Norris A. N.** On the existence of flexural edge waves on submerged elastic plates // Proc. R. Soc. Lond. Series A. 2000. Vol. 456. P. 1559—1582.

7. **Lord Rayleigh.** On waves propagated along the plane surface of an elastic solid // Proc. of the London Mathematical Society. 1885. Vol. 17, № 253. P. 4—11.

8. **Konenkov Yu. K.** A Rayleigh-type exural wave // Soviet Physics-Acoustics. 1960. № 6. P. 122—123.

9. **Zakharov D. D.** Konenkov's waves in anisotropic layered plates // Acoustical Physics. 2002. Vol. 48. P. 171—175.

10. **Zakharov D. D.** Analysis of the acoustical edge flexural mode in a plate using refined asymptotics // Journal of the Acoustical Society of America. 2004. Vol. 116, № 2. P. 872—878.

11. **Musylev S. F.** Edge Waves under Ice Cover at a Straight Coast with a Sloping Beach // Oceanology. 2006. Vol. 46, № 4. P. 465—471.

12. **Lawrie J. B., Kaplunov J. D.** Edge waves and resonance on elastic structures: An overview // Journal of Mathematics and Mechanics of Solids. 2011. URL http://mms.sagepub.com/content/earlv/2011/07/09/1081286511412281.abstract

13. **Scharfenberg S., Rocklin D. Z., Chialvo C.** et al. Probing the mechanical properties of graphene using a corrugated elastic substrate // Appl. Phys. Lett. 2011. Vol. 98. P. 091908.

14. **Kossovich E.** Explicit models for flexural edge and interfacial waves in thin elastic plates // A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy, Brunei University, School of Information Systems, Computing and Mathematics. 2011. P. 108.

15. **Глухова О. Е., Коссович Е. Л.** Явные модели распространения краевых волн в многослойных графеновых пластинах // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 5. С. 8—14.

16. **Reddy C. D., Rajendran S., Liew K. M.** Equilibrium configuration and continuum elastic properties of finite sized graphene // Nanotechnology. 2006. Vol. 17. P. 864—870.

17. **Arroyo M., Belytschko T.** Finite crystal elasticity of carbon nanotubes based on the exponential Cauchy-Born rule // Phys. Rev. B. 2004. Vol. 69. P. 115415 (11).

18. **Brenner D. W.** Empirical Potential for Hydrocarbons for Use in Simulating the Chemical Vapor Deposition of Diamond Films // Phys. Rev. B. 1990. Vol. 42. P. 9458—9471.

19. **Brenner D. W., Shenderova O. A., Harrison J. A., Stuart S. J., Ni B., Sinnott S. B.** Asecond-generation reactive empirical bond order (REBO) potential energy expression for hydrocarbons // J. Phys.: Condens. Matter. 2002. Vol. 14. P. 783—802.

20. **Kudin K. N., Scuseria G. E., Yakobson B. I.** C2F, BN, and C nanoshell elasticity from ab initio computations // Phys. Rev. B. 2001. Vol. 64. P. 235406 (10).

21. **Shimpi R. P., Patel H. G.** A two variable refined plate theory for orthotropic plate analysis // Int. J. Solids and Structures. 2006. Vol. 43. Is. 22—23. P. 6783—6799.

22. **Tsiatas G. C., Yiotis A. J.** A microstructure-dependent orthotropic plate model based on a modified couple stress theory // Recent Developments in Boundary Element Methods, A Volume to Honour Professor John T. Katsikadelis, Sapountzakis E. (ed.). Southampton: WIT Press, 2010. P. 295—308.

23. **Setoodeh A. R., Malekzadeh P., Vosoughi A. R.** Nonlinear free vibration of orthotropic graphene sheets using nonlocal Mindlin plate theory // Proc. IMechE, Part C: J. Mechanical Engineering Science. 2012. Vol. 226. P. 1896—1906.

24. **Narendar S., Gopalakrishnan S.** Scale effects on buckling analysis of orthotropic nanoplates based on nonlocal two-variable refined plate theory // Acta Mech. 2012. Vol. 223. P. 395—413.
25. **Wang Q.** Effective in-plane stiffness and bending rigidity of armchair and zigzag carbon nanotubes // Int. J. Solid Struct. 2004. Vol. 41. P. 5451—5461.
26. **Shokrieh M. M., Rafiee R.** Prediction of Young's modulus of graphene sheets and carbon nanotubes using nanoscale continuum mechanics approach // Materials and Design. 2010. Vol. 31. P. 790—795.
27. **Глухова О. Е., Терентьев О. А.** Теоретическое исследование электронных и механических свойств C—N однослойных нанотрубок // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2007. Т. 10, № 4. С. 85—89.
28. Глухова О. Е. Жесткость Y-образных углеродных нанотрубок при деформации растяжения/сжатия // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 1. С. 19—22.
29. **Frank O., Tsoukleri G., Parthenios J.** et al. Compression Behavior of Single-layer Graphene // ACS nano. 2010. Vol. 4, Is. 6. P. 3131—3138.
30. **Palser A. H. R.** Interlayer interactions in graphite and carbon nanotubes // Phys. Chem. 1999. Vol. 1, N 18. P. 459—464.
31. **Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S.** Theory of Plates and Shells // A McGraw-Hill Classic Textbook Reissue. McGraw-Hill Book Company, 1987.
32. **Neek-Amal M., Peeters F. M.** Linear reduction of stiffness and vibration frequencies in defected circular monolayer graphene // Physical Review, Series B. 2010. Vol. 81. P. 235437.
33. **Scharfenberg S., Rocklin D. Z., Chialvo C.** et al. Probing the mechanical properties of graphene using a corrugated elastic substrate // Appl. Phys. Lett. 2011. Vol. 98. P. 091908.
34. **Adam H., Palser R.** Interlayer interactions in graphite and carbon nanotubes // Phys. Chem. Chem. Phys. 1999. Vol. 1. P. 4459—4464.

УДК 548.53

И. А. Аверин, д-р техн. наук, проф., зав. каф.,
И. А. Губич, аспирант, e-mail: vanyk_88@mail.ru
Пензенский государственный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ АЛЮМИНИЕВОЙ ФОЛЬГИ — СТАДИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРИСТОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Поступила в редакцию 30.10.2012

Представлены результаты исследования процесса рекристаллизации алюминиевой фольги. Выявлены закономерности образования рекристаллизованных зерен при изменении температуры и времени отжига.

Ключевые слова: *рекристаллизация, пористый оксид алюминия, термический отжиг, атомно-силовая микроскопия, оптическая микроскопия*

Введение

Применение нанотехнологий в различных сферах деятельности человека позволяет сэкономить на сырье и потреблении энергии, сократить выбросы в атмосферу вредных веществ и т. д.

Параметры современных приборов на основе микроэлектронных компонентов в большинстве своем достигли своего предела. Выход из этого положения заключается в использовании наноматериалов, так как на их основе возможно создание приборов и компонентов с принципиально новыми физико-химическими свойствами, которые ранее считались недостижимыми.

Одними из приоритетных направлений синтеза наноматериалов являются методы, в основе которых лежит принцип самоорганизации. К таким материалам относятся пористые наноструктурированные матрицы оксида алюминия, отличающиеся высокоупорядоченной структурой и относительной простотой синтеза.

В работах [1—4] приводятся результаты исследования технологии создания пористых упорядоченных структур на алюминии. В то же время процессам предварительной подготовки поверхности алюминиевой основы, которые играют значительную роль в достижении высокой упорядоченности пор, уделяется недостаточное внимание.

Первоначальными процессами, обусловливающими упорядоченность пористой структуры оксида алюминия, являются процессы предварительной подготовки поверхности алюминиевых основ, а именно:

- химическая или электрохимическая полировка;
- термический отжиг (рекристаллизация).

Химическая и электрохимическая полировки рассматриваются в литературе [5—7], при этом процессу термического отжига, который обеспечивает увеличение размера микрокристаллов (зерен) алюминия по сравнению с исходным материалом, уделяется меньшее внимание. Упорядочение пор может происходить в области одного зерна, следовательно, чем больше размер зерен, тем больше домены, имеющие упорядочение.

Поэтому целью данной работы является исследование влияния режимов термического отжига на микроструктуру алюминиевой фольги.

Виды рекристаллизации

После прокатки алюминиевой основы зерна остаются в деформированном состоянии с повышенной внутренней энергией. С ростом температуры диффузионная подвижность атомов возрастает, что приводит к изменениям микроструктуры [8, 9].

Выделяют несколько видов рекристаллизации (рис. 1).

Первичная рекристаллизация (рекристаллизация обработки) — заключается в росте новых зерен за

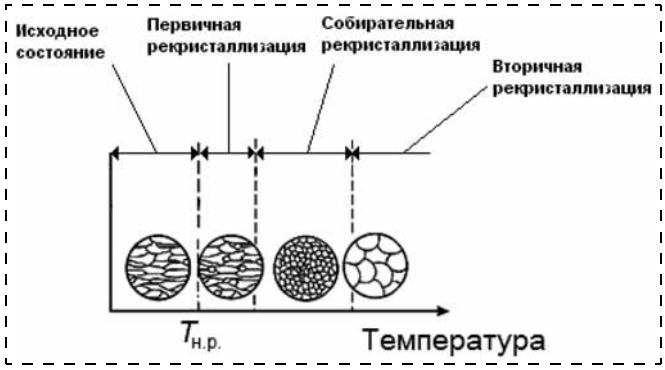

Рис. 1. Изменение структуры металла при нагреве

счет образования центров рекристаллизации. Воздействием температуры постепенно формируют структуру из недеформированных зерен. Таким методом можно измельчить зеренную структуру металла [8, 9].

Собирательная рекристаллизация — процесс роста рекристаллизованных зерен при дальнейшем нагреве. Основой этого процесса является поглощение мелких зерен более крупными.

Вторичная рекристаллизация — процесс роста укрупненных зерен металла [8—10].

Условия эксперимента

В качестве материала для исследования процесса рекристаллизации используется высокочистая алюминиевая фольга 99,99 % толщиной 14 мкм. Температура начала рекристаллизации определяется следующей формулой:

$$T_{н.р} = \alpha T_{пл}, \quad (1)$$

где $T_{н.р}$ — температура начала рекристаллизации; $T_{пл}$ — температура плавления металла; α — коэффициент, зависящий от степени чистоты металла.

Для технически чистых металлов $\alpha = 0{,}4$, для сплавов со структурой твердых растворов $\alpha = 0{,}5...0{,}6$. Уменьшение или увеличение доли примесей в составе металла понижает коэффициент α до 0,1...0,2 или увеличивает его до 0,7...0,8 соответственно [8, 9].

Так как в эксперименте используется высокочистая фольга, то α изменяется в диапазоне от 0,1 до 0,2. Подставляя значения коэффициента α в уравнение (1), получаем диапазон температуры начала рекристаллизации, равный 70...130 °С.

Отжиг осуществлялся в муфельной печи Naberthern L40/12 (Германия). Контроль параметров микроструктуры выполнялся методами оптической (ОМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ).

Эксперимент проводился в два этапа:

- изменяли температуру в диапазоне от 100 до 600 °С при постоянном времени отжига, равном 1 ч;
- изменяли время отжига в диапазоне от 1 до 6 ч при постоянной температуре отжига 100 °С.

Обсуждение результатов эксперимента

Изображения поверхности алюминиевой фольги, полученные на оптическом и атомно-силовом микроскопах, приведены на рис. 2—4 (см. вторую сторону обложки).

Определение изменения геометрических параметров микроструктуры проводилось из расчета минимального и максимального ограничивающих размеров зерна (рис. 5).

Результаты анализа изображений, полученных с помощью ОМ и АСМ, указывают на увеличение размера зерна. Следует отметить, что при температуре 600 °С и времени отжига 6 ч в исходном материале образуются места выгорания.

Применение методов математической статистики [10, 11] к экспериментальным данным обеспечило получение зависимостей минимального и максимального ограничивающих размеров зерна от времени и температуры отжига:

$$D = A\ln(t) + B; \quad (2)$$

где D — минимальный или максимальный ограничивающие размеры зерна, мкм; t — время отжига, ч; A и B — коэффициенты, зависящие от чистоты исходного материала.

$$D = F\mathbf{e}^{J}T, \quad (3)$$

где T — температура отжига, °С; F и J — коэффициенты, зависящие от чистоты исходного материала.

Данный тип зависимости связан с плавным переходом между процессами первичной, собирательной и вторичной рекристаллизаций.

Экспоненциальный вид зависимости (3) объясняется увеличением скорости диффузионных процессов перераспределения атомов в кристаллической структуре металла с увеличением температуры.

Значения коэффициентов в уравнениях (2) и (3) приведены в таблице.

Как видно из рис. 6 и 7, зависимости имеют линейный и экспоненциальный виды соответственно. Повышение температуры и увеличение продолжи-

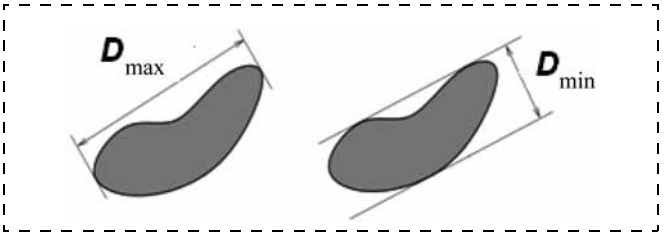

Рис. 5. Минимальный и максимальный ограничивающие размеры зерна

Коэффициенты уравнений (2) и (3) для исходной алюминиевой фольги

Ограничивающие размеры зерна	АСМ				ОМ			
	A	*B*	*F*	*J*	*A*	*B*	*F*	*J*
	мкм			$^{\circ}C^{-1}$	мкм			$^{\circ}C^{-1}$
Минимальный	0,251	0,176	0,252	0,002	7,09	26,88	19,88	0,001
Максимальный	0,389	0,481	0,135	0,003	18,84	72,83	60,91	0,001

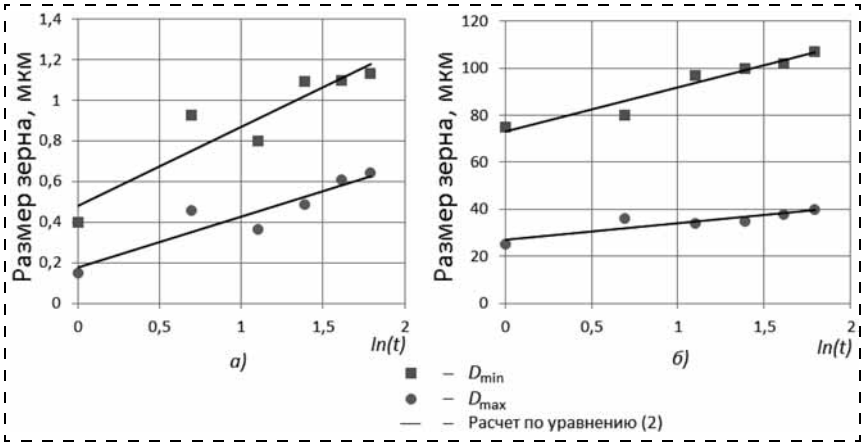

Рис. 6. Зависимость минимального и максимального ограничивающих размеров зерна от времени отжига:
а — результаты, полученные на АСМ; *б* — результаты, полученные на ОМ

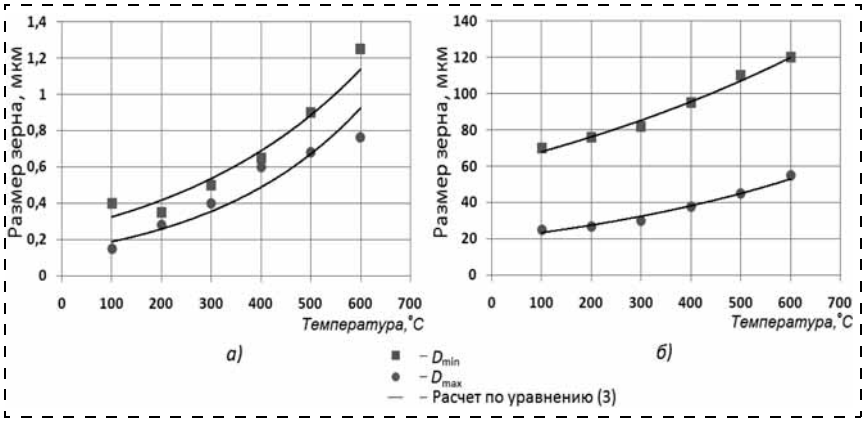

Рис. 7. Зависимость минимального и максимального ограничивающих размеров зерна от температуры отжига:
а — результаты, полученные на АСМ; *б* — результаты, полученные на ОМ

тельности отжига приводит к увеличению размера зерна.

Согласно информации, представленной в работах [8, 9], размер рекристаллизованного зерна напрямую зависит от миграции границы между старым деформированным и новым недеформированным зерном. Эта граница всегда мигрирует в направлении деформированного зерна, что приводит к поглощению деформированного зерна новым растущим зерном. При высоких температурах скорость миграции границы увеличивается.

Выводы

- Установлены закономерности процессов рекристаллизации алюминиевой фольги.
- Найдены качественные и количественные зависимости размеров зерен от температуры и времени отжига.
- Определены оптимальные условия отжига алюминиевой фольги для получения необходимого размера зерна.
- Установлено, что при температуре 600°С и времени отжига 6 ч в исходном материале образуются места выгорания.

Список литературы

1. **Мошников В. А., Соколова Е. Н., Спивак Ю. М.** Формирование и анализ структур на основе пористого оксида алюминия // Изв. СпБГЭТУ "ЛЭТИ". 2011. № 2. С. 13—19.

2. **Афанасьев А. В., Ильин В. А., Мошников В. А., Соколова Е. Н., Спивак Ю. М.** Синтез нано- и микропористых структур электрохимическими методами // Биотехносфера. 2011. № 1—2, (13—14). С. 20—26.

3. **Аверин И. А., Губич И. А., Печерская Р. М.** Формирование и исследование пористых оксидных пленок на алюминии // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 6. С. 11—14.

4. **Напольский К. С., Росляков И. В.** Калибровочные решетки на основе самоорганизующихся структур пористого оксида алюминия. Факультет наук о материалах, МГУ им. М. В. Ломоносова. 2004. С. 30—35.

5. **Липкин Я. Н., Бершадская Т. М.** Химическое полирование металлов. М.: Машиностроение, 1988. 112 с.

6. **Лайнер В. И.** Справочное руководство по гальванотехнике. М.: Металлургия, 1969. Т. 2. 423 с.

7. **Гинберг А. М.** Инженерная гальванотехника в приборостроении. М.: Машиностроение, 1977. 512 с.

8. **Callister W. D.** Materials Science and Engineering // An Introduction, 7th edition. New-York: John Wiley & Sons, 2007.

9. **Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П**. Материаловедение. М.: Машиностроение, 1990. 528 с.

10. **Костин В. Н., Тишина Н. А.** Статистические методы и модели: учеб. пособие. Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. 138 с.

11. **Румшиский Л. З.** Математическая обработка результатов эксперимента: Справ. пособие. М.: Наука, 1971. 192 с.

УДК 621.3.049.774

П. П. Мальцев, д-р техн. наук, проф., директор,
Д. Л. Гнатюк, мл. науч. сотр.,
Ю. В. Фёдоров, зав. лаб.,
А. В. Зуев, мл. науч. сотр.,
Р. Р. Галиев, мл. науч. сотр.,
Н. В. Побойкина, инженер,
e-mail: iuhfseras2010@yandex.ru,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН)

ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛОСИГНАЛЬНЫХ И ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАМОРФНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ ДЛЯ МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ В КРАЙНЕВЫСОКОЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ

Поступила в редакцию 23.10.2012

Описаны результаты научно-исследовательской работы, проведенной ИСВЧПЭ РАН, в которой созданы экспериментальные образцы метаморфных гетероструктур для изготовления на их основе монолитных интегральных схем усилителя мощности и малошумящего усилителя диапазона рабочих частот 57...64 ГГц и исследованы характеристики изготовленных тестовых транзисторов.

Ключевые слова: *монолитная интегральная схема, метаморфная гетероструктура, малошумящий усилитель, усилитель мощности*

Метаморфные наногетероструктуры с InGaAs каналом с содержанием индия 30...55 % широко используются в мире для изготовления монолитных интегральных схем (МИС) в диапазоне частот 60...90 ГГц и выше [1—4].

В Российской Федерации, к сожалению, отечественная транзисторная элементная база диапазона 60...90 ГГц не существует. Полное отсутствие отечественных полупроводниковых материалов, пригодных для изготовления МИС с рабочими частотами 60...90 ГГц, неуклонно увеличивает отставание отечественных производителей ЭКБ электронной компонентной базы (ЭКБ) и в развитии современных технологий, и в опыте проектирования.

В результате научно-исследовательской работы, проведенной ИСВЧПЭ РАН, созданы экспериментальные образцы метаморфных гетероструктур для изготовления на их основе МИС усилителя мощности и малошумящего усилителя с диапазоном рабочих частот 57...64 ГГц и исследованы характеристики изготовленных тестовых транзисторов.

Для исследования зависимости статических, малосигнальных и шумовых характеристик метаморфных (МНЕМТ) транзисторов в крайневысокочастотном (КВЧ) диапазоне от ширины (W_g) и длины (L_g) затворов были изготовлены наборы транзисторов с длиной грибообразных затворов в диапазоне 50...250 нм. Каждый набор состоял из четырех транзисторов с разной шириной затворов W_g: 2 × 30, 2 × 40, 2 × 60 и 2 × 80 мкм. Транзисторы изготавливались на гетероструктурной подложке InAlAs/InGaAs/GaAs диаметром 50 мм. Схема и описание гетероструктуры приведены в [5].

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) транзисторов измерялись на установке Tektronix 370A. ВАХ транзисторов с минимальной и максимальной длиной затвора показаны на рис. 1 и 2.

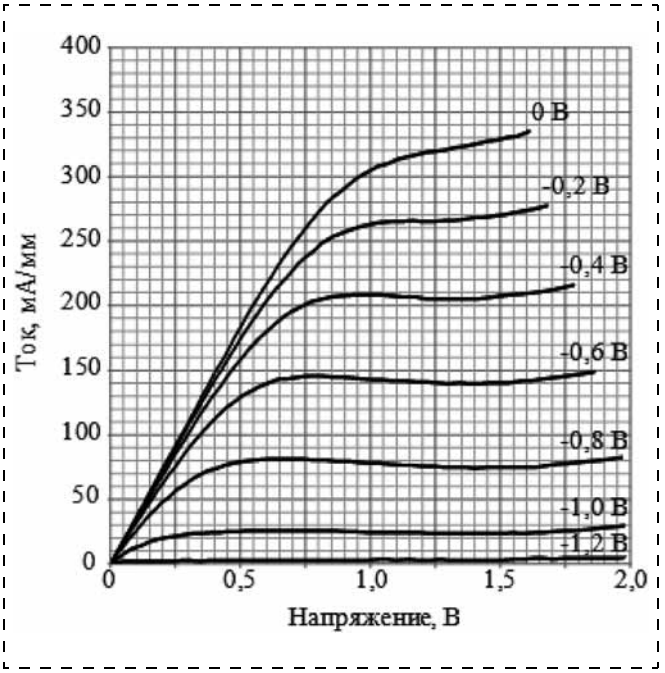

Рис. 1. ВАХ МНЕМТ транзистора с L_g = 50 нм

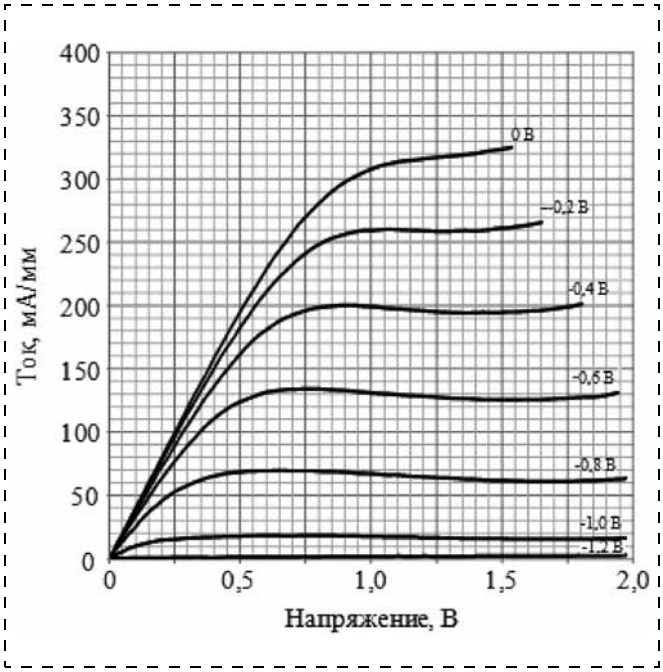

Рис. 2. ВАХ МНЕМТ транзистора с L_g = 250 нм

Транзисторы с короткими затворами не закрываются до конца. Вероятно, это связано с особенностями технологии изготовления, а именно — жидкостного травления подзатворного заглубления через узкую щель. Для затворов длиной 250 нм пороговое напряжение затвор-исток составляет – 1,2 В. Напряжение отсечки для обеих длин затворов примерно равно 0,8 В. Выходная проводимость МНЕМТ практически не зависит от L_g вследствие тонкой гетероструктуры — расстояние затвор-канал составляет 15 нм. Максимальные значения крутизны ВАХ транзисторов также слабо зависят от длины затвора и находятся в диапазоне значений 300...325 мСм/мм.

S-параметры (параметры рассеяния) транзисторов измерялись непосредственно на пластине с помощью векторного анализатора Agilent E8361A в диапазоне частот 0,01...67 ГГц. Результаты этих измерений транзисторов с шириной затвора W_g 2 × 30, 2 × 40, 2 × 60 и 2 × 80 мкм и с L_g = 50 и L_g = 250 нм показаны на рис. 3—5 (см. третью сторону обложки). Результаты соответствуют транзисторам, расположенным в одном и том же рабочем модуле на пластине. Маркерами на рисунках отмечены значения предельных частот усиления по току (f_t), по напряжению (f_{max}), а также максимально достижимые значения коэффициента усиления на частоте 60 ГГц.

Как следует из рис. 3, значение f_t транзисторов с L_g = 250 нм относительно невелико и составляет 53...55 ГГц для всего набора образцов. Для транзисторов с L_g = 50 нм значение f_t варьируется от 96 ГГц (2 × 30 мкм) до 134 ГГц (2 × 80 мкм). Такая разница объясняется тем, что оценка f_t выполнялась с помощью результатов измерений без учета так называемого де-эмбеддинга контактных площадок транзисторов. Поскольку по мере увеличения ширины затвора емкость контактных площадок становится все более сравнимой с емкостью самого затвора, то для транзисторов с коротким затвором влияние процедуры де-эмбеддинга контактных площадок на СВЧ характеристики тем существеннее, чем меньше ширина затвора.

Максимально достижимое значение коэффициента усиления на частоте 60 ГГц транзисторов с L_g = 250 нм составляет 8...12,4 дБ (см. рис. 4). Однако транзисторы с L_g = 50 нм имеют меньший разброс значений данного параметра 11,8...12,9 дБ ввиду более высоких частот перегиба зависимости максимально достижимого/стабильного коэффициента усиления по мощности для затворов 2 × 60 мкм и 2 × 80 мкм (50 и 60 ГГц вместо 30 и 46 ГГц соответственно).

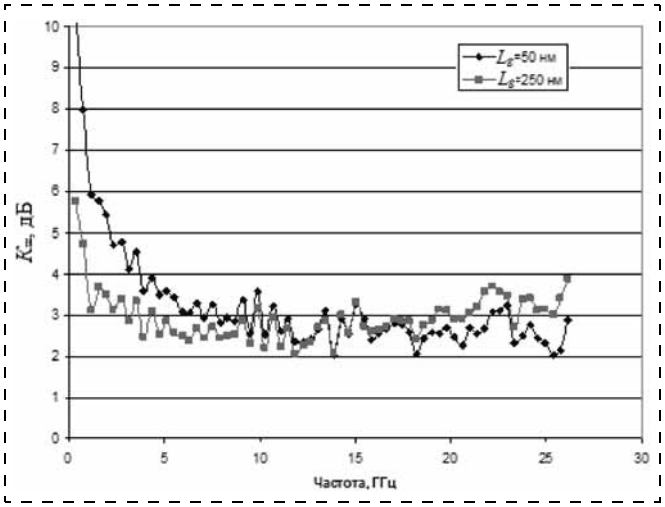

Рис. 6. Частотная зависимость $K_ш$ для транзисторов с W_g = 2 × 30 мкм и с длиной затвора 50 и 250 нм

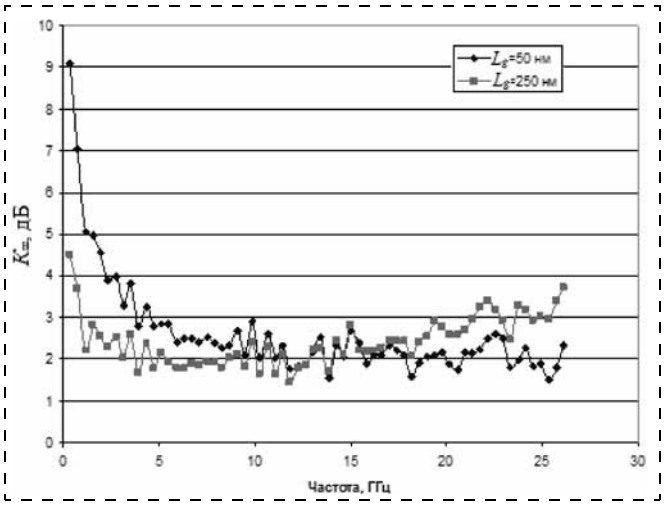

Рис. 7. Частотная зависимость $K_ш$ для транзисторов с W_g = 2 × 40 мкм и с длиной затвора 50 и 250 нм

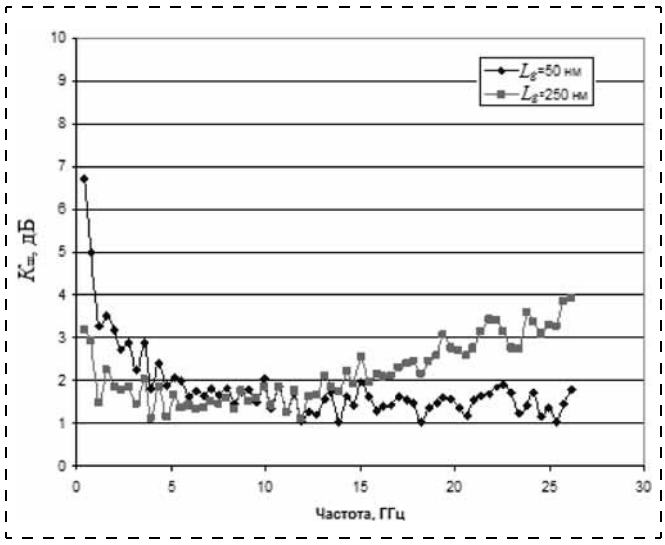

Рис. 8. Частотная зависимость $K_ш$ для транзисторов с W_g = 2 × 60 мкм и с длиной затвора 50 и 250 нм

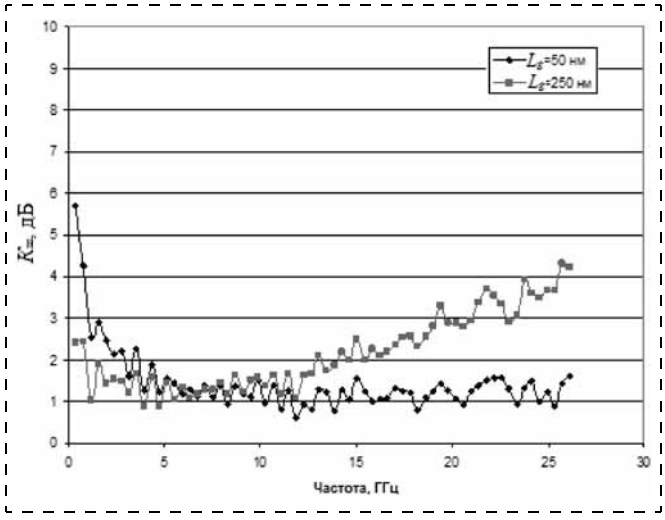

Рис. 9. Частотная зависимость $K_ш$ для транзисторов с W_g = 2 × 80 мкм и с длиной затвора 50 и 250 нм

Оценка параметра f_{max} (см. рис. 5) демонстрирует значения порядка 500 ГГц для L_g = 50 нм и 230...430 ГГц для L_g = 250 нм.

После выполнения полного де-эмбеддинга были определены внутренние величины f_t и f_{max} транзисторов, которые достигали 200 ГГц и 500 ГГц соответственно [5].

Полученные значения рассмотренных параметров, очевидно, позволяют использовать такие транзисторы для разработки МИС с рабочими частотами вплоть до 100 ГГц.

Коэффициент шума ($K_ш$) транзисторов измерялся на установке Agilent N8975A в диапазоне 0,3...26 ГГц в 50-омном тракте. Результаты измерений транзисторов с W_g = 2 × 30, 2 × 40, 2 × 60 и 2 × 80 мкм и с L_g = 50 нм и L_g = 250 нм показаны на рис. 6—9.

Для всех рассмотренных транзисторов прослеживается принципиально одинаковая закономерность. На частотах ниже 12 ГГц $K_ш$ транзисторов с длинным затвором меньше, чем $K_ш$ транзисторов с коротким затвором. Однако при этом наблюдается его возрастание с частотой, тогда как для коротких затворов $K_ш$ практически постоянен. При этом разница между шумовыми параметрами транзисторов с длинными и короткими затворами тем меньше, чем меньше ширина затворов. По мере увеличения общей ширины затворов $K_ш$ транзисторов в 50-омном тракте с ростом частоты уменьшается для коротких затворов и увеличивается для длинных.

* * *

Разработанная технология эпитаксиального роста метаморфных гетероструктур InAlAs/InGaAs/GaAs позволила создать СВЧ транзисторы, пригодные для создания на их основе МИС малошумящих усилителей и усилителей мощности КВЧ в диапазоне частот 50...100 Гц. Для достижения оптимальных характеристик разрабатываемых МИС необходимо подбирать длину и ширину затворов транзисторов в соответствии с рабочим частотным диапазоном.

Работа выполнена в рамках государственного контракта № 16.426.11.0046 от 12 сентября 2011 года по заказу Минобрнауки России.

Список литературы

1. **Бугаев А. С., Галиев Г. Б., Мальцев П. П.** и др. Полупроводниковые гетероструктуры InAlAs/InGaAs с метаморфным буфером $In_x(Al_yGa_{1-y})_{1-x}As$: конструкция, технология, применение // Микро- и наносистемная техника. 2012. № 10. С. 14—24.

2. **Gunnarsson S. E., Karnrelt C., Zirath H.** et al. / Single-Chip 60 GHz Transmitter and Receiver MMICs in a GaAs mHEMT Technology // Microwave Symposium Digest. 2006. P. 801—804.

3. **Millimeter-wave** Broadband Amplifier using MHEMT / Yong Hyun Baek, Sang Jin Lee,Tae Jong Baek, et al. // Global Symposium on Millimeter Waves GSMM 2008. 2008. P. 48—51.

4. **Q-, V-, and W-band** power amplifiers utilizing coupled lines for impedance matching / M. Abbasi, H. Zirath, I Angelov // Microwave Symposium Digest. 2008. P. 863—866.

5. **Михайлович С. В., Фёдоров Ю. В., Бугаев А. С.** и др. Построение масштабируемой шумовой модели MHEMT на GaAs с L_g от 50 до 250 нм // Доклады ТУСУРа. 2011. № 2 (24). Часть 2. С. 31—35.

УДК 661.66:53.089.52.661.51

И. И. Бобринецкий, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: vkn@nanotube.ru,
А. В. Бессонова, аспирант, науч. сотр.,
И. А. Комаров, аспирант, науч. сотр.,
А. М. Маловичко, студент,
М. Ю. Назаркин, аспирант, науч. сотр.,
В. К. Неволин, д-р физ.-мат. наук, проф.,
В. С. Рымаренко, студент,
К. А. Царик, канд. техн. наук, вед. инж.-техн.,
Национальный исследовательский университет МИЭТ, г. Москва (Зеленоград)

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕНСОРНЫХ СВОЙСТВ ПЕРКОЛИРОВАННЫХ СЕТОК ИЗ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК И НАНОВОЛОКОН ZnO

Поступила в редакцию 30.10.2012

Предложен метод повышения чувствительности сенсорных структур на основе нанопроводников за счет использования гетерогенных композитов из углеродных нанотрубок и полупроводниковых нановолокон. Разработана сенсорная структура с чувствительным слоем в виде композита нанотрубки/нановолокна. Исследована зависимость удельной поверхности композита углеродных нанотрубок и нановолокон оксида цинка, а также электрического сопротивления и откликов сенсорных структур на пары аммиака от соотношения концентраций нанопроводников в смеси.

Выявлена максимальная чувствительность сенсорных структур при комнатной температуре, а также показана корреляция чувствительности с изменением массовой доли УНТ в смеси УНТ/ZnO, что может быть использовано при создании сенсорных систем типа "электронный нос".

Ключевые слова: *удельная поверхность, аммиак, газовые сенсоры*

Введение

Детектирование химических веществ на основе широкого сцектра наноструктур, используемых в качестве активного сенсорного слоя, вызывает огромный интерес в последние годы не только со стороны научной общественности, но и со стороны разработчиков сенсорных систем благодаря наличию ряда отличительных свойств у низкоразмерных материалов, таких как высокая чувствительность, низкая стоимость и относительная простота изготовления химических сенсоров на их основе [1]. Например, МДП-транзистор на основе полупроводниковых однослойных нанотрубок может быть использован для обнаружения опасных промышленных газов NO_2 и NH_3 [2]. Продемонстрирована возможность детектирования биологически опасных газов предельно низких концентраций на основе нанопроводов различных оксидных полупроводниковых материалов, таких как SnO_2, In_2O_3 [3, 4]. ZnO является одним из широко используемых материалов в сенсорной технике в настоящее время, и исследования в настоящий момент направлены на повышение его чувствительности за счет использования наноразмерной фазы [5].

Для повышения чувствительности устройств используются различные методики на основе дополнительной химической функционализации и модификации на наноуровне [6, 7]. Одним из возможных методов повышения качества сенсорных наноструктур является создание композитов на основе нанопроводников, обладающих различными свойствами Так, нанотрубки, обладающие высокими удельной поверхностью и проводимостью, а также возможностью детектировать химические вещества при комнатной температуре, могут быть объединены с монокристаллическими полупроводниковыми нанопроводами, которые характеризуются высокой стабильностью и химической стойкостью наряду с высокой чувствительностью, а также потенциальной селективностью к различным газам [8]. Данные синергетические свойства активно используются при изготовлении элементов фотовольтаики на основе гетеропереходов углеродных нанотрубок и нановолокон ZnO [9, 10].

Комбинация в едином устройстве нанопроводных сенсоров, обладающих различными свойствами, в частности, различным уровнем изменения зонной структуры в присутствии газов, является одним из направлений формирования систем типа "электронный нос" на одном кристалле [11]. Тем не менее, создание устройств на изолированных нанопроводах сопряжено с технологическими трудностями идентичного воспроизведения свойств от кристалла к кристаллу. Более перспективным может являться создание композитов из различных нанопроводников, различающихся электрохимическими свойствами, но обеспечивающих стабильность и воспроизводимость свойств [12]. В работе исследуются свойства композита, состоящего из перколированных сеток на основе углеродных нанотрубок и нановолокон ZnO в составе сенсора паров аммиака.

Приготовление композита углеродных нанотрубок и нановолокон оксида цинка

Нановолокна ZnO были получены методом низкотемпературного жидкостного осаждения без катализатора. Для этого использовали водный раствор 0,1М уротропина ($C_6H_{12}N_4$) с добавлением 0,01М нитрата цинка ($Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$). Значение pH готового раствора составило 6,78. Раствор помещали в водяную баню, нагретую до 80 °С, и выдерживали его там в течение 60 мин. После окончания процесса на дне колбы образовывался белый

осадок. Для фильтрации осадка использовали обеззоленную фильтровальную бумагу, после чего проводили промывку и сушку полученного порошка. Размер частиц определяли с помощью метода спектрометрии динамического рассеяния света на установке Photocor Complex. Полученные данные спектрометрии, атомно-силовой (АСМ) и сканирующей ионной микроскопии согласуются: диаметр нановолокон составил от 30 до 60 нм, длина от 300 до 900 нм. Нановолокна в сечении имели вид правильного шестиугольника.

В работе использовались промышленно производимые многослойные углеродные нанотрубки (МСНТ, ООО "НТЦ ГраНаТ") диаметром от 2 до 10 нм максимумом распределения в области ~5 нм [13]. Для приготовления композита нановолокон и нанотрубок нановолокна аккуратно снимались с подложки с помощью скальпеля, и приготавливалось несколько навесок массой от 0,4 до 1,6 мг. Аналогичные навески получали из МСНТ, после чего в пробирки Эппиндорфа заливалось 1,5 мл 2-пропанола и добавлялись навески для приготовления растворов с концентрациями от 20 масс. % МСНТ/80 масс. % ZnO (20 % МСНТ) до 90 масс. % МСНТ/10 масс. % ZnO (80 % МСНТ). Для перемешивания раствор подвергался ультразвуковой обработке в ультразвуковой ванне BRANSON B3OO (Branson, Нидерланды).

Разработка сенсорной структуры на основе углеродных нанотрубок и нановолокон оксида цинка

Кристалл, на который осаждался композит МСНТ/ZnO, представлял собой кремниевую подложку КДБ-10 с термически выращенным слоем оксида кремния толщиной 800 нм. На поверхность кристалла методами оптической фотолитографии и термического испарения были нанесены контактные площадки Au/V толщиной 150 нм. Размер площадок составлял 150 × 300 мкм с расстоянием между ними 50 мкм. Кристалл помещали на нагревательный элемент, выполненный в виде SMD-резистора с сопротивлением 4,3 Ом, и распаивали в корпус ТО-5 (четыре изолированных вывода) серии КЮЯЛ 431433.018 (ОАО "Завод "МАРС", г. Торжок). Фотография сенсорного элемента в корпусе приведена на рис. 1.

Для нанесения МСНТ/ZnO из раствора 2-пропанола был использован метод диэлектрофореза [14, 15]. На кристалл, подключенный к источнику переменного напряжения, сверху из микродозатора наносилась капля раствора объемом 1...3 мкл. К контактным площадкам подводился переменный сигнал амплитудой 20 В и частотой 100 кГц до возникновения проводимости между контактами. Было изготовлено по

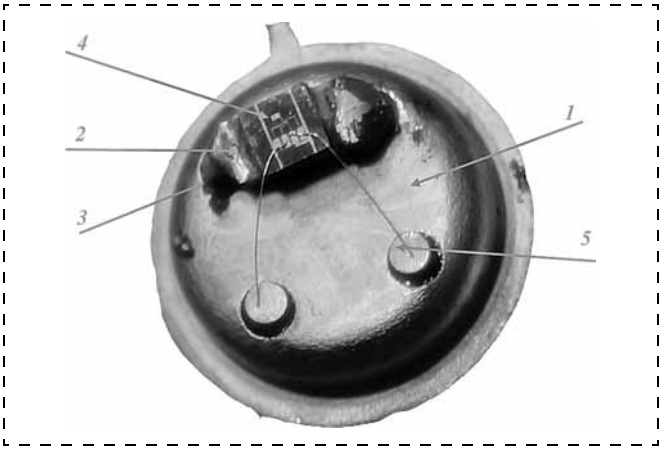

Рис. 1. Фотография сенсора в корпусе типа ТО-5 без крышки:
1 — корпус; *2* — нагреватель; *3* — разводка к нагревателю; *4* — кристалл с МСНТ/ZnO-нанопроводами; *5* — разводка к золотым контактным площадкам

три серии образцов для каждой концентрации МНСТ/ZnO.

Исследование полученной композитной пленки на поверхности электродов проводили в модуле фокусированного ионного пучка (ФИП, FEI, США) нанотехнологического комплекса Нанофаб НТК-100 (ЗАО "Нанотехнологии — МДТ", Россия). Полученные результаты для двух типов концентраций МНСТ/ZnO приведены на рис. 2. Несмотря на длительное перемешивание нанотрубки и нановолокна не образовали однородную смесь: нановолокна ZnO имеют тенденцию к формированию агрегатов в локальных областях пленок МСНТ при примерно равных массовых соотношениях. Заметное перемешивание начинает происходить при концентрации МСНТ менее 30 масс. %, что может быть связано с высокой удельной плотностью нановолокон по сравнению с нанотрубками. Также из рис. 2, *а* следует, что при низких концентрациях нановолокон проводимость между контактными площадками может обеспечиваться только за счет перколяции нанотрубок. Домини-

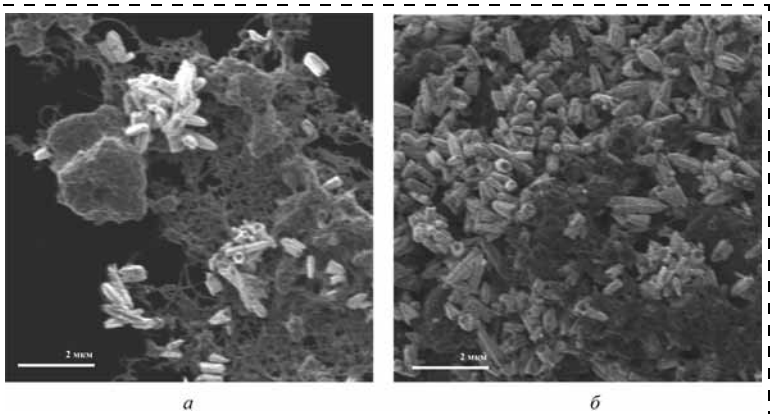

Рис. 2. Изображение во вторичных электронах поверхности пленки композита МСНТ/ZnO-нановолокон между электродами (кадр 10 × 10 мкм) для различного соотношения концентраций МСНТ/ZnO:
а — 50 масс. % МСНТ; *б* — 20 масс. % МСНТ

рующий вклад в транспорт носителей заряда со стороны ZnO может возникнуть только при концентрациях нанотрубок ниже 20 масс. % из-за различного соотношения объемов нанотрубок и нановолокон. При этом измерения электрического сопротивления показали, что именно с данной концентрации начинает проявляться нестабильность электрических характеристик структуры, что связано с плохим контактным сопротивлением, возникающим как между нановолокнами, так и между нановолокнами и золотым электродом.

Удельная поверхность композита углеродных нанотрубок и оксида цинка

Удельная поверхность композита МСНТ/ZnO определялась по методу Брунауэра—Эммета—Теллера (БЭТ), основанному на физической сорбции газов материалами при низких температурах [16]. Удельная поверхность определялись по сорбции азота при 77 K на анализаторе удельной поверхности "Сорбтометр-М" (ЗАО "Катакон", г. Новосибирск). Навеску композита МСНТ/ZnO массой порядка 2 мг помещали в стеклянную ампулу и проводили измерение изотерм адсорбции и десорбции по процедуре, описанной в работе [13]. По изотерме адсорбции рассчитывали удельную поверхность 5-точечным методом БЭТ (диапазон относительного давления p/p_0 = 0,05...0,25). Полученная зависимость удельной поверхности представлена на рис. 3.

В целом результаты согласуются с полученными ранее данными: удельная поверхность чистых МСНТ составляет 667,9 м^2/г [16], удельная поверхность нановолокон ZnO — примерно 16 м^2/г [17]. Из рис. 3 следует, что удельная поверхность увеличивается нелинейно в зависимости от содержания МСНТ в смеси. Имеется ярко выраженный пик в области равного массового отношения нанотрубок к нановолокнам, который в дальнейшем падает до локального минимума в районе 70 % содержания МСНТ и далее идет линейный рост. Данный факт может быть связан с наблюдаемым на ФИП-изображениях изменением агломерационного состояния нанотрубок и нановолокон: при высокой концентрации нанотрубок нановолокна включены в матрицу из нанотрубочного материала, и удельная поверхность в основном определяется поверхностью нанотрубок (см. рис. 2, *б*); при уменьшении концентрации нанотрубок начинает происходить разделение фракций нанотрубок и нановолокон на отдельные агломераты. Можно ожидать, что такое разделение особенно выражено на концентрации МСНТ/ZnO ~50 масс. %.

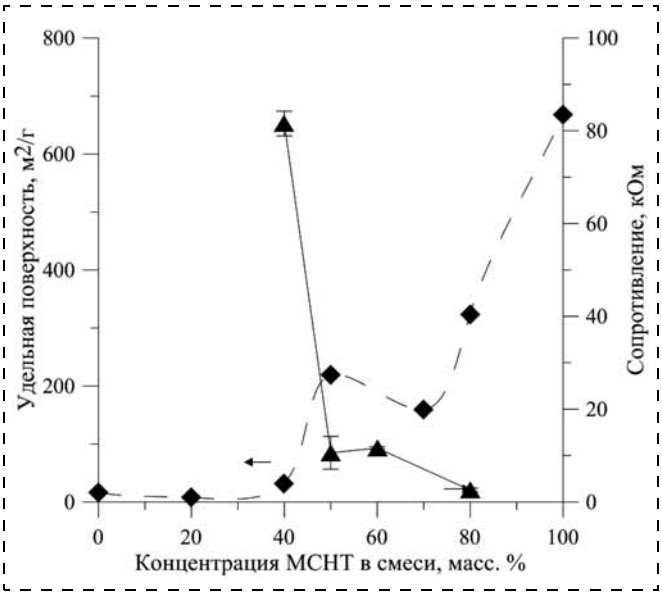

Рис. 3. Зависимость удельной поверхности смеси углеродных нанотрубок и нановолокон оксида цинка (◆) и сопротивления структуры (▲) от содержания УНТ в смеси

Исследование отклика сенсоров на аммиак

Начальное сопротивление сенсорных структур рассчитывалось по наклону линейного участка зависимости тока через структуру от приложенного напряжения с использованием измерителя параметров полупроводниковых приборов ИППП-1/5 (ЗАО "МНИПИ", Республика Беларусь) (рис. 3). В целом наблюдается закономерность уменьшения сопротивления с увеличением концентрации нанотрубок. При уменьшении концентрации МСНТ в два раза с 80 до 40 масс. % сопротивление увеличивается более чем на порядок с ~2 до ~80 кОм. При этом, как было отмечено выше, более низкие концентрации МСНТ приводят к нестабильности электрических характеристик с превышением сопротивления до десятков мегаомов. Сенсорные свойства измеряли на специально разработанном стенде, состоящем из шестнадцатиканального измерительного стенда параметров газовых датчиков ИПС-16 (ЗАО "Практик-НЦ", Россия), персональной ЭВМ, системы подачи паров этанола и форвакуумного мембранного насоса.

Форвакуумный насос использовался для создания равномерного потока воздушной смеси в камере. Система подачи аммиака состояла из микродозатора и барбатера. Барбатер использовался для смешивания паров аммиака с воздухом.

Исследование сенсорных свойств проводили при введении паров аммиака (аммиак водный насыщенный, ОСЧ, ЗАО "База № 1 Химреактивов"). Сенсор помещали в камеру, к которой подключали насос, и начиналось продувание атмосферным воздухом. В процессе экспериментов в барбатер вносилось заданное количество аммиака, что при известном расходе воздуха (8 л/мин), проходящего через систему, и при известном времени испарения водного раствора аммиака позволяет рассчитать его концентрацию. При этом продувание воздухом не останавливалось.

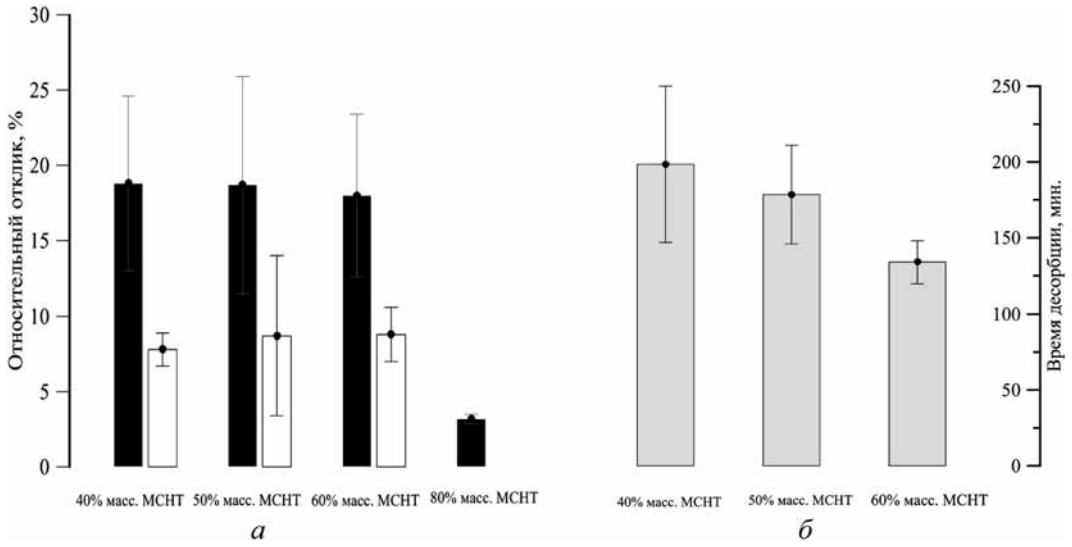

Рис. 4. Сенсорные свойства структур с различным составом чувствительного слоя в парах аммиака:
а — относительный отклик при введении концентраций 300 ppm (белый) и 1000 ppm (черный); *б* — время десорбции при комнатной температуре после экспонирования 1000 ppm аммиака

В измерительную систему подавались пары аммиака с концентрацией ~1000 ppm при различных температурах нагревателя. При экспонировании парами аммиака происходит повышение сопротивления сенсоров на величину

$$\Delta R = R_{\text{газ}} - R_{\text{атм}},$$

где $R_{\text{атм}}$ — сопротивление сенсора в нормальных условиях (атмосфера воздуха); $R_{\text{газ}}$ — сопротивление сенсора при пропускании через атмосферу паров аммиака. Отклик сенсора (чувствительность) рассчитывался как отношение

$$S = \Delta R / R_{\text{атм}}.$$

Найденные относительные отклики сенсоров на аммиак при комнатной температуре приведены на рис. 4, *а*. Время отклика составило ~3 мин для всех типов сенсоров, время десорбции и восстановления исходных значений без нагрева приведено на рис. 4, *б*. При дополнительном нагреве до 120 °С время десорбции уменьшается и составляет от 20 до 30 мин. На рис. 5 приведена циклограмма изменения сопротивления сенсорной структуры с 60 масс. %. МСНТ при циклическом введении 1000 ppm аммиака при температуре 120 °С. Величина отклика структур достаточно стабильна и воспроизводима. Аналогичные по характеру изменения сопротивления циклограммы получены для остальных концентраций МСНТ выше 20 масс. %. Сенсоры с концентрацией МСНТ менее 20 масс. % проявляли нестабильность в сопротивлении при любых температурах.

Также были проведены эксперименты при различном напряжении на нагревателе до максимального значения 1,5 В, что соответствует $T \approx 200$ °С (при которой проводили экспонирование и десорбцию). При нагреве отклик (чувствительность) для всех сенсорных структур уменьшается до насыщения в области $S = 0{,}03$ (рис. 6). Данный факт может быть связан с тем, что при нагреве уменьшается потенциальный барьер, возникающий между нанотрубками, волокнами и электродом. Отметим, что при высокой концентрации нанотрубок

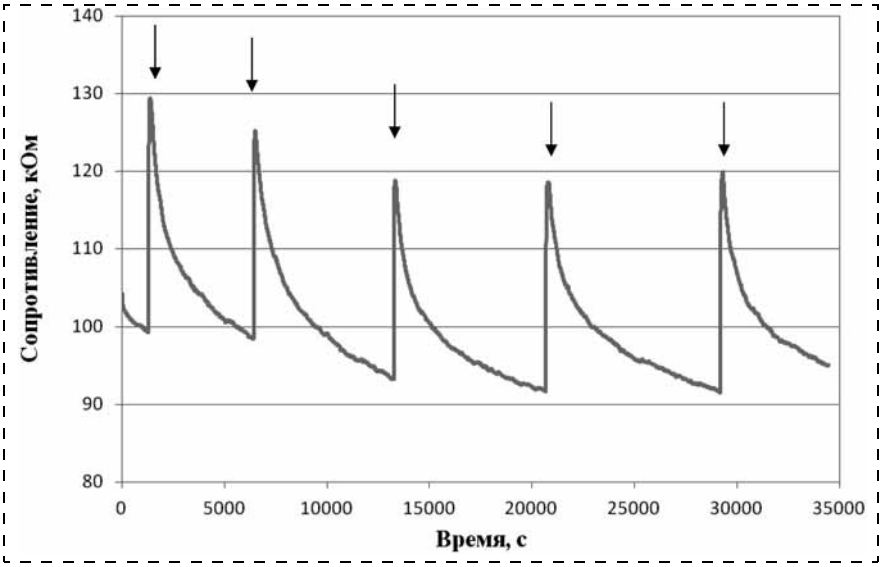

Рис. 5. Циклограмма чувствительности сенсора с 60 % МСНТ при введении 1000 ppm аммиака (указаны стрелками) при температуре 120 °С

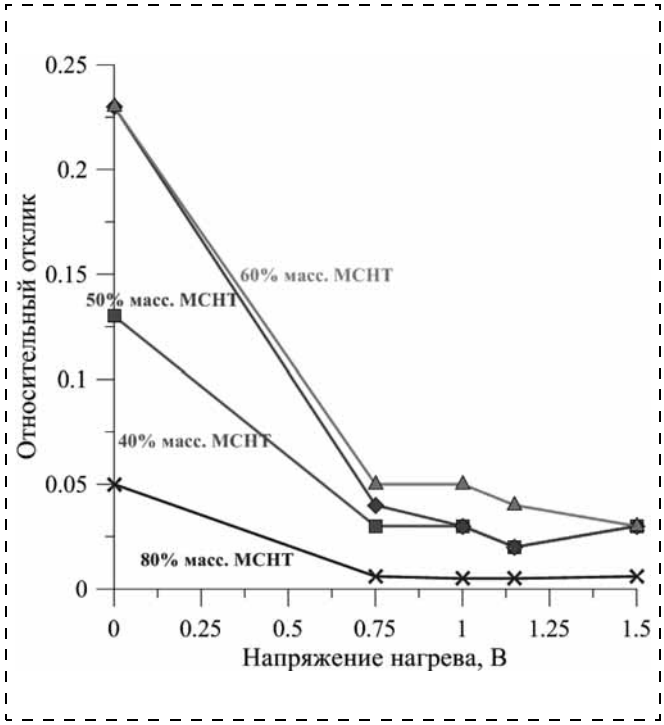

Рис. 6. Зависимость отклика сенсора от напряжения на нагревателе для различных концентраций нанотрубок

(выше 80 масс. %) чувствительность композитной структуры ухудшается, что может свидетельствовать о превалирующем вкладе в чувствительность нановолокон ZnO.

Механизм взаимодействия аммиака с нановолокнами ZnO до конца не ясен. Сорбционно-десорбционный механизм чувствительности связан с обратимой физической адсорбцией аммиака на нанопроводах ZnO. Молекулы аналита формируют обратимый отклик в сопротивлении благодаря обмену зарядовыми состояниями между аммиаком и поверхностью ZnO, что приводит к изменению области обеднения на поверхности полупроводника [18], которая для данного типа нановолокон может составлять несколько нанометров в глубину [19].

Известно, что кислород, адсорбируясь на поверхности нанопровода ZnO в виде ионов O_2^-, O^- и O^{2-}, вытягивает электроны из зоны проводимости [20]. Механизм чувствительности может быть основан на взаимодействии между отрицательно заряженным кислородом, адсорбированным на поверхности ZnO, и детектируемым газом. В процессе данной реакции аммиак может восстанавливать кислород, что должно приводить к освобождению части электронов и увеличению проводимости ZnO [21]. Данный эффект наблюдается в сенсорных системах на нановолокнах ZnO при температурах выше 200 °C [22]. Сенсоры на основе ZnO обнаруживают температурную зависимость чувствительности к аммиаку NH_3. В работе [22] описан механизм чувствительности одиночных нановолокон ZnO к аммиаку, основанный на сдвиге уровня Ферми при изменении температуры. При комнатной температуре, уровень Ферми лежит выше химического потенциала молекулы NH_3, что выражается в увеличении сопротивления сенсорной структуры за счет переноса электронов на молекулу NH_3. При нагреве происходит сдвиг уровня Ферми ниже химического потенциала NH_3, что ведет к переносу заряда с молекулы на нанопровод.

Для чистых нанотрубок наблюдается обратный процесс: при любых температурах при добавлении аммиака происходит увеличение сопротивления пленки за счет уменьшения числа основных носителей заряда в МСНТ [23], а также за счет увеличения работы выхода носителей заряда при адсорбции аммиака в области контакта нанотрубок [24]. Наблюдаемая низкая чувствительность сенсорных структур с композитом, содержащим 80 масс. % МСНТ и более, свидетельствует о меньшем вкладе в сенсорные свойства со стороны нанотрубок, обладающих металлическими свойствами, по сравнению с полупроводниковыми нановолокнами.

Следует отметить, что *n*-тип проводимости ZnO меняется преимущественно за счет кислородных вакансий из атмосферы воздуха и дефектов на поверхности, которые вызывают уменьшение концентрации носителей заряда и, тем самым, улучшают чувствительность сенсорной структуры. При этом нанотрубки являются очень сильными сорбентами кислорода [25], так что изменение свойств нановолокон ZnO может происходить не только под действием кислорода воздуха, но и кислорода, адсорбированного на стенках нанотрубок [9]. Более того, в случае одномерных структур при взаимодействии с аналитом существуют два механизма детектирования: изменение состояния на границах зерен (контактах) и изменение объемной проводимости. В случае молекул NH_3 превалирующим считается первый механизм, когда молекулы аммиака, адсорбируясь, изменяют состояния на границах нанопроводов ZnO [21]. В случае сенсора с композитом МСНТ/ZnO основной вклад в чувствительность приходится на контакт между нановолокном ZnO и нанотрубками или между нанотрубками. Как можно видеть на рис. 3, при увеличении концентрации ZnO $R_{атм}$ увеличивается, что свидетельствует о росте вклада сопротивления полупроводниковых нановолокон в сопротивление всей структуры. При этом, согласно рис. 3, удельная поверхность уменьшается, но, тем не менее, удельная поверхность для 50 масс. % превышает на порядок удельную поверхность для 20 масс. % МСНТ, что говорит об увеличении числа сорбционных центров, а следовательно, чувствительности структуры.

Выводы

Были разработаны сенсорные структуры на основе композита МСНТ/ZnO с различным соотношением концентраций. Увеличение концентрации нанотрубок приводит к увеличению сорбционных свойств и уменьшению сопротивления чувствительного слоя. Чувствительность сенсора максимальна в области концентраций нанотрубок от 40 до 60 масс. % и определяется эффектом формирования гетерогенной системы из смеси нанотрубок и нановолокон в области концентраций 50 масс. %.

Продемонстрировано, что различная концентрация нанотрубок в многокомпонентном активном слое обусловливает различную чувствительность к аммиаку, что может стать предпосылкой для формирования сенсорных систем типа "электронный нос" на основе различных типов нанопроводных структур.

Работа выполнена при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (государственный контракт № № 16.740.11.0375 и соглашение № 14.B37.21.0064).

Список литературы

1. **Cui Y., Wei Q., Park H. K.** et al. Nanowire Nanosensors for Highly Sensitive and Selective Detection of Biological and Chemical Species // Science. 2001. Vol. 293, N 5533. P. 1289—1292.

2. **Kong J., Franklin N. R., Zhou C.** et al. Nanotube Molecular Wires as Chemical Sensors // Science. 2000. Vol. 287, N 5453. P. 622—625.

3. **Yu C., Han Q., Saha S.** et al. Integration of metal oxide nanobelts with microsystems for nerve agent detection // Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology. 2005. Vol. 11, Iss. 6.

4. **Zhang D., Liu Z., Li C.** et al. Detection of NO_2 down to ppb Levels Using Individual and Multiple In_2O_3 Nanowire Devices // Nano Lett. 2004. N 4 (10). P. 1919—1924.

5. **Wang J. X., Sun X. W., Yang Y.** et al. Hydrothermally grown oriented ZnO nanorod arrays for gas sensing applications // Nanotechnology. 2006. N 17 (19). P. 4995.

6. **Lao C., Li Y., Wong C. P.** et al. Enhancing the Electrical and Optoelectronic Performance of Nanobelt Devices by Molecular Surface Functionalization // Nano Lett. 2007. N 7 (5). P. 1323—1328.

7. **Chen X. H. and Moskovits M.** Observing Catalysis through the Agency of the Participating Electrons: Surface-Chemistry-Induced Current Changes in a Tin Oxide Nanowire Decorated with Silver // Nano Lett. 2007. N 7 (3). P. 807—812.

8. **Chang Fu Dee, Ishaq Ahmad, Yan Long** et al. Contact welding study of carbon nanotube with ZnO nanowire Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. 2011. Vol. 43, Is. 10. P. 1857—1862.

9. **Emtah Unalan Husnu, Hiralal Pritesh** et al. Flexible organic photovoltaics from zinc oxide nanowires grown on transparent and conducting single walled carbon nanotube thin films // Journal of Materials Chemistry. 2008. N 18. P. 5909—5911.

10. **Li C., Jin Z., Chu H.** et al. Seed-Mediated Growth of ZnO Nanorods on Multiwalled // Carbon Nanotubes Journal of Nanoscience and Nanotechnology. 2008. Vol. 8. N 9. P. 4441—4446.

11. **Chen Po-Chiang, Ishikawa Fumiaki N., Chang Hsiao-Kang** et al. A nanoelectronic nose: a hybrid nanowire/carbon nanotube sensor array with integrated micromachined hotplates for sensitive gas discrimination // Nanoteclinology. 2009. N 20.

12. **Huang Hongwen, Yu Qing, Ye Yinghui** et al. Thin copper oxide nanpwires/carbon nanotubes interpenetrating networks for lithium ion batteries // CrystEngComm, 2012.

13. **Бобринецкий И. И., Бессонова А. В., Неволин В. К.** и др. Разработка методик исследования сорбционных свойств агломератов углеродных нанотрубок // Известия вузов. Электроника. 2011. № 2. С. 43—50.

14. **Бобринецкий И. И.** Электрофорез в задачах очистки, сепарирования и интеграции углеродных нанотрубок // Российские нанотехнологии. 2010. Т. 4, № 1—2. С. 110—114.

15. **Бобринецкий И. И., Неволин В. К., Горшков К. В.** и др. Использование метода диэлектрофореза при формировании интегральных структур на основе углеродных нанотрубок // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 2. С. 10—13.

16. **Peigney A., Laurent Ch., Flahaut E.** et al. Specific surface area of carbon nanotubes and bundles of carbon nanotubes // Carbon. 2001. Vol. 39. Is. 4. P. 507—514.

17. **Wang Xinjuan, Zhang Qinglin, Wan Quiang** et al. Controllable ZnO Architectures by Ethanolamirie-Assisted Hydrothermal Reaction for Enhanced Photocatalytic Activity // J. Phys. Chem. 2011. Vol. 115. P. 2769—2775.

18. **Lupan Oleg, Chai Guangyu, Chow Lee.** Novel hydrogen gas, sensor based on single ZnO nanorod // Microelectronic Engineennng. 2008. Vol. 85, Iss. 11. P. 2220—2225.

19. **Lu J. G., Chang P. C., Fan Z. Y.** Quasi-one-dimensional metal oxide materials-synthesis, properties and applications // Mater. Sci. Eng. R 2006. N 52. P. 49—91.

20. **Raju A. R., Rao C. N. R.** Gas-sensing characteristics of ZnO and copper-impregnated ZnO // Sens. Actuators B Chem. 1991. N 3 (4). P. 305.

21. **Gupta S. K.** Aditee Joshi and Manmeet Kaur. Development of gas sensors using ZnO nanostructures // J. Chem. Sci. 2010. Vol. 122, N 1. P. 57—62.

22. **Fan Z. Y., Lu J.-G.** Chemical sensing with ZnO nanowire field-effect transistor // IEEE Trans. Nano. 2006. Vol. 5, N 4. P. 393—396.

23. **Ahn Kyoung Soo, Kim Ji Hoon, Lee Kyoung Nam** et al. Multi-Wall Carbon Nanotubes as a High-Efficiency Gas Sensor // J. Korean Phus. Soc., 2004. Vol. 45, N 1. P. 158—161.

24. **Бобринецкий И. И., Неволин В. К., Строганов А. А.** и др. Чувствительность структур на основе сеток из пучков углеродных нанотрубок к изменению концентрации аммиака в атмосфере // Датчики и системы. 2007. № 9. С. 22—27.

25. **Ulbricht H., Moos G., Hertel T.** Interaction of molecular oxygen with single-wall carbon nanotube bundles and graphite // Surface Science. 2003. Vol. 532—535. P. 852—856.

УДК 621.375.8

С. Кернбах,
Институт параллельных и распределенных систем Штутгартский Университет, Штутгарт, Германия,
e-mail: serge.kernbach@yahoo.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОНИКАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СВЕТОДИОДНОГО И ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ. Ч. 1

Поступила в редакцию 28.08.2012

Рассматривается взаимодействие между светодиодным и лазерным излучателем и детекторами на двойных электрических слоях (ДЭС) с целью выявления возможной высокопроникающей компоненты излучения. Технология ДЭС-детекции сигналов может найти применение для разработки новых микросенсоров в системах глубоководной аварийной связи. Эксперименты проводили в лабораторных условиях внутри здания на расстоянии 0,25—50 м между приборами, в том числе с препятствиями в виде железобетонных конструкций, и в полевых условиях на расстоянии 1,65 км. Всего было проведено около 100 независимых экспериментов с более чем 700 замерами. В первой части этой работы описываются условия и методология экспериментов и проведение контрольных измерений на малых расстояниях.

Ключевые слова: *системы подводной связи, светодиодное и лазерное излучение, сенсоры на основе двойных электрических слоев, высокопроникающая компонента излучения*

Введение

Данная работа основана на исследовании подводной коммуникации посредством слабых электрических полей. Этот подход инспирирован слабоэлектрическими рыбами [1, 2], которые используют различные свойства электрических полей в воде для навигации, сенсорных функций и координации коллективных активностей. Создание заданного коллективного поведения изучалось как в системах с биологическими агентами [3], с применением различных биоинспирированных подходов [4], так и в чисто коллективных технических системах, таких как рои микроботов [5]. Высокая степень подавления электромагнитных и оптических сигналов в воде создает определенные трудности в реализации этих методов коллективного управления для автономных подводных систем [6]. Нахождение эффективной негидроакустической системы коммуникации представляет собой одну из приоритетных научных и технических задач в этой области.

Разработанное оборудование для генерации и восприятия слабых электрических полей было установлено на небольших автономных необитаемых подводных аппаратах (АНПА) [7, 8]. Коллективные эффекты, достигаемые, например, с помощью нелинейных осцилляторов, связанных посредством электрических полей, являются одним из эффективных способов исследования подводной среды роем АНПА. Для этих целей в некоторых экспериментах частота модуляции сигнала, подаваемого на электроды в воде, составляла порядка 0,01—0,001 Гц. Подобная низкая частота модуляции создавала эффект глубоко поляризованных электродов и возникновение двойного электрического слоя на границе электрода и воды.

Было замечено, что результаты коммуникационных экспериментов зависят не только от расстояний между АНПА и их взаимной ориентации, но также от режима работы сверхярких голубых светодиодов, которые используются для навигационных целей АНПА. Поскольку подсистема оптической коммуникации посредством светодиодов не связана с подсистемой генераторов электрических полей на борту АНПА, то их взаимосвязь стали искать в физических эффектах, возникающих между поляризованными электродами и излучающими светодиодами в воде. В некоторых работах, например [9, 10], исследовали подобную взаимосвязь, которая и привлекла наше внимание для дальнейших исследований.

Как указывалось в работе [11] и было исследовано в ряде работ [12—14], диффузионный слой Гуи—Чепмена, помимо других факторов, также чувствителен к пространственной поляризации диполей воды. Соответствующие электрокинетические явления описываются моделью Гуи—Чепмена—Штерна, например [14, 15]. Предполагается, что именно слой Гуи—Чепмена является основным фактором во взаимодействии между поляризованными электродами и излучением лазера/светодиодов. Поскольку изменение структур в слое Гуи—Чепмена изменяет диэлектрические характеристики системы, то эффекты поляцизации можно измерять посредством слабого постоянного тока, протекающего через электроды и воду. На этом принципе основана работа сенсора.

Поскольку работы [9, 10] указывали на возможное наличие излучения со свойствами нехарактерными для электромагнитных взаимодействий, было решено сначала реплицировать некоторые из этих экспериментов, для того чтобы проверить наличие указанного феномена. В работе [16] были реплицированы три основополагающих эксперимента из [9] по взаимодействию между светодиодным излучателем (в дальнейшем генератор) и глубоко поляризованными электродами. В част-

ности, были строго выдержаны условия изоляции экспериментов от электромагнитных (ЭМ) полей, механических, акустических и температурных воздействий до того уровня, который позволяли примененные измерительные приборы. Следуя схемотехническим решениям кондуктометрии (см., например, [17—20]), были изготовлены девять токовых сенсоров, объединенных в три установки, и два светодиодных генератора. На основании более 200 независимых замеров был также обнаружен факт реакции изолированных сенсоров на генератор как напрямую, так и косвенно через контейнер с водой. Более того, эффект реструктуризации диполей воды под действием светодиодного излучения сохранялся на протяжении нескольких дней, что было многократно подтверждено в этих экспериментах. В целом эти репликационные эксперименты были оценены как положительные, т. е. эффект взаимодействия был подтвержден. Поскольку во время экспериментов не были зафиксированы изменения ЭМ полей, температуры, акустических и механических параметров имеющимися измерительными средствами, то в качестве рабочего названия были оставлен термин "не ЭМ-компонента" для обозначения этого взаимодействия. Некоторые теоретические работы указывают на возможность подобных взаимодействий [21—23].

Работа [16] оставила множество вопросов открытыми. В частности, не было исследовано расстояние, на котором сенсоры и генератор все еще продолжают взаимодействовать. Кроме того оставалось открытым, ведет ли изменение мощности излучателя и использование второго генератора к увеличению степени общего эффекта взаимодействия. Данная работа призвана заполнить этот пробел. Мы намерены пошагово увеличивать расстояние с 0,25 м (из [16]) до 50 м (максимальное расстояние в нашем здании) в лабораторных условиях и сделать серию полевых экспериментов за пределами здания на расстоянии в 1,65 км. Поскольку исходные работы использовали также лазерный излучатель, мы, в свою очередь, изготовили и провели эксперименты с полупроводниковыми лазерами. Эта статья расширяет результаты, опубликованные в работе [24], относительно лазерного излучения, максимальной дистанции и конструкции приборов, и является основой для работы [25] в области дальних и сверхдальних расстояний. Эта технология может найти применение для разработки новых сенсоров в системах аварийной связи, например для глубоководных АНПА. Поскольку структуры диполей не налагают существенных ограничений на размеры электродов, данная система допускает высокую степень миниатюризации.

1. Устройство и характеристики поведения сенсоров и лазерного/светодиодного генератора

Устройство сенсоров. Подробное описание детекторов, светодиодного генератора и общей методологии экспериментов дано в работе [16]. Было изготовлено пять сенсорных установок, основанных на двух- и четырехэлектродных кондуктометрических схемах (см., например, [17—20]), которые используют постоянное напряжение на электродах. В этом состоит их основное отличие от промышленных аналогов, подающих переменное, до 10 кГц, напряжение на электроды. Структурная схема показана на рис. 1, *а*. Сенсоры представляют собой сосуды из стекла (установки № 3 и 5) и коррозионно-стойкой стали (установка № 3) с несколькими стальными или платиновыми электродами, погруженными в бидистиллированную воду (рис. 1, *б*, *в*). Все сосуды помещены в несколько изолирующих корпусов, выполненных из латуни. Пространство между корпусами заполнено натуральной шерстью для теплоизоляции. Для экспериментов в этой работе использовались установки № 3, 4, 5 (рис. 2), которые содержат по три однотипных сенсора. Таким образом, поступающий сигнал детектировался одновременно девятью сенсорами. Для контроля параметров окружающей среды замеряли значения механических воздействий тремя акселерометрами KXSC7-2050 (чувствительность 660 мВ/g); температуру измеряли тремя типами сенсоров: NCP21XV103J03RA, LM35AH и AD592CNZ, размещенными в восьми местах на всех установках, с чувствительностью измерения ниже 0,01 °С с 20-битным АЦП; измерения ЭМ поля проведены с анализатором спектра 9 кГЦ...7 ГГц производства Rohde & Schwarz; акустические воздействия измеряли прибором Metrel C-MI 6301 (20...10000 Гц, 30...130 дБ). Флюктуации электромагнитного поля не были обнаружены выше −90 дБм, акустических помех выше 30 дБ, т. е. на грани чувствительности этих приборов. Дополнительно к работе [16] в этой работе измерялась интенсивность ЭМ и магнитного поля прибором ME 3951A производства Gigaherz Solutions в диапазоне 5 Гц...400 кГц. Всего записывалось 25 каналов данных с частотой дискретизации 1 Гц. Все значения помечены маркером времени. Запись выполняли непрерывно без включения или выключения детекторов.

Лазерные и светодиодные генераторы. Лазерные и светодиодные генераторы имеют одинаковую структуру, показанную на рис. 3, *а*. Для лазерного генератора использовали 36 VCSEL лазерных модуля типа LT производства фирмы Electron (www.electronlaser.com), красного излучения (650 нм) мощностью 5 мВт. Для светодиодного генератора использовали 169 голубых (470 нм) светодиодов LC503FBL1-15Q-A3 с силой света 11 кда и

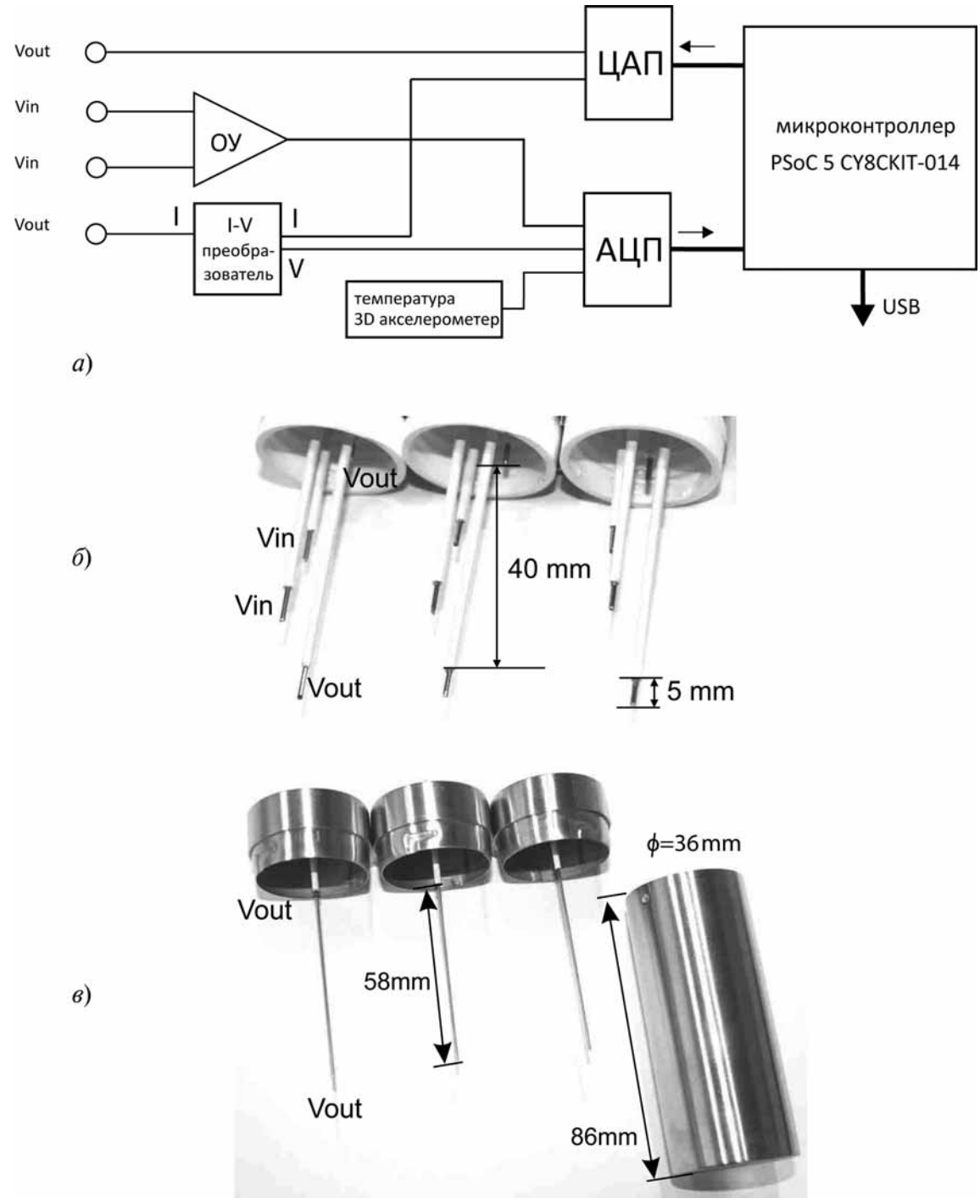

Рис. 1. Общая схема детекторов и фотографии электродов:
а — структура четырехэлектродной схемы; *б* — электроды в установке № 3; *в* — электроды в установке № 4. Фотографии взяты из работы [16]

углом открытия 15°. Как лазерные модули, так и светодиоды были размещены на площади 120 × 120 нм (рис. 3, *б*) в стандартных корпусах, допускающих соединение нескольких генераторов в один излучатель.

Лазерные диоды работают в стандартном 5-вольтовом режиме с первичной модуляцией в пределах до 1 МГц. Светодиоды работают в нестандартном режиме 30 и 48 В прямого напряжения с первичной и вторичной модуляцией и требуют предварительной калибровки. Основные диаграммы работы светодиодного генератора показаны на рис. 4 (см. четвертую сторону обложки).

Для настройки замеряли напряжение на выходе микроконтроллера и *n*-канального MOS-FET ключа, который управляет светодиодами (см. схему на рис. 3, *а*). Использовали следующие параметры генератора: t_a — время активации светодиода; f_f —

частота первичной модуляции; f_s — частота вторичной модуляции; V_L — напряжение на светодиоде (см. ниже табл. 2). Кроме того, на основании показаний амперметра оценивали потребляемую (излучаемую) мощность генератора W_g из 169 светодиодов (разделенные на восемь полей). Для первой версии генератора предельным напряжением, подаваемым на светодиоды, является напряжение в 30 В, для второй версии — 60 В. Как видно из диаграмм на рис. 4, большое прямое напряжение создает колебания опорного напряжения (емкость светодиодов на частоте 1 МГц составляет около 95 пФ). Кроме того, отчетливо заметен скачок напряжения на спаде импульса — около 50 В для опорного напряжения в 29 В (рис. 4, *б*). Большое напряжение, подаваемое на светодиоды в коротком импульсе, является нетипичным режимом работы. Мы практически не смогли найти публикаций по возникающим физическим эффектам в p—n-переходе излучающего полупроводника. Высокое напряжение на полупроводнике требует также некоторых оригинальных схемотехнических решений для конструкции генератора, высоковольтная версия светодиодного генератора защищена патентами Федеративной Республики Германии и Европейского Союза.

Рис. 2. Фотография установок № 3, 4, 5

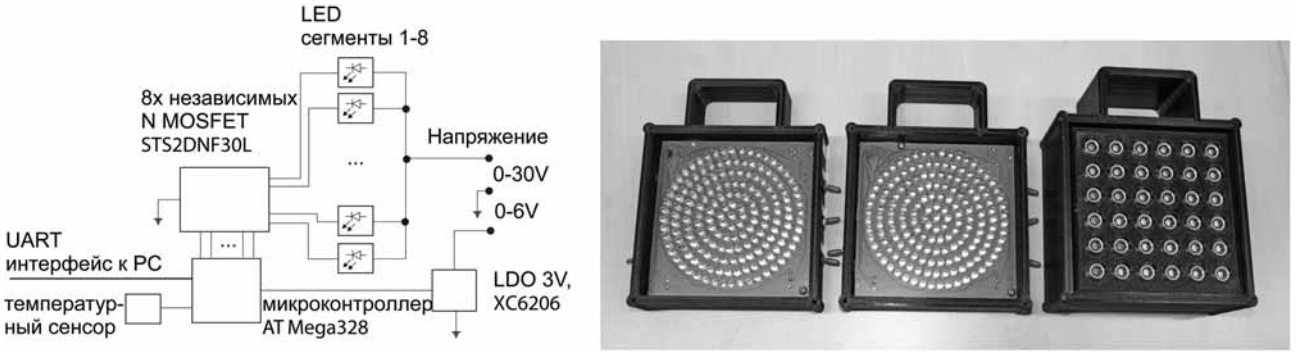

Рис. 3. Структура (*а*) и общий вид (*б*) светодиодного и лазерного излучателей со снятой фронтовой крышкой

Тестировали также закрытие фронтовой части генератора различными крышками на предмет экранирования от высокопроникающего неЭМ излучения. В частности, на основе работ [26, 27] исследовали многослойную (не менее 20 слоев) поперечно-продольную структуру (рис. 5), изготовленную из биосовместимого полимера — полиактида с толщиной волокна 0,5 мм, который в расправленном состоянии механически вытягивался в одном направлении. Первые эксперименты действительно продемонстрировали снижение влияния генератора на сенсоры. Однако дальнейшее систематическое исследование этого вопроса лежит за пределами данной работы.

Необходимо также заметить, что первая версия этого генератора не содержит индуктивных элементов в отличие от исходного генератора Боброва [9, 10]. Во избежание паразитических связей светодиодный генератор запитан полностью от аккумуляторов.

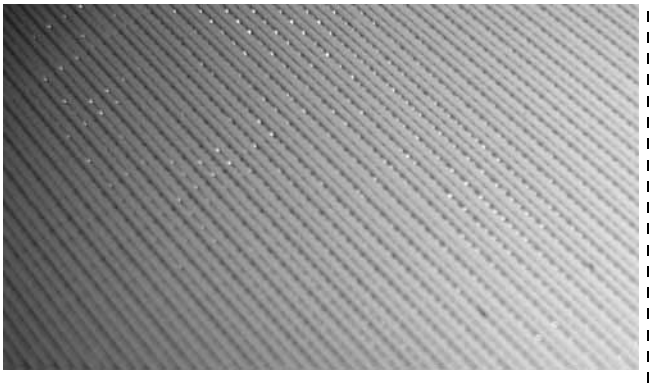

Рис. 5. Многослойная (не менее 20 слоев) поперечно-продольная структура, изготовленная из биосовместимого полимера — полиактида с толщиной волокна 0,5 мм, используемая для фронтовой крышки светодиодного и лазерного генераторов

Генератор работает в автономном режиме и в режиме с внешним управлением. Основной режим — это автономное включение и выключение в определенные промежутки времени посредством таймера микроконтроллера, как правило это 1 ч работы — 3 ч перерыв. В том случае, когда необходима обратная связь, генератор подключают к портативному компьютеру через USB-интерфейс. Для обеспечения гальванической развязки с коммуникационной сетью портативный компьютер подключен или через разделительный Ethernet-hub (так называемый AC-coupled switch, например, производства *Micrel*), или же используется WiFi-связь (вдали от лаборатории B).

2. Методология экспериментов

Схема проведения экспериментов показана на рис. 6. Все сенсорные установки помещены в шкафу, сделанном из трехмиллиметровой стали. Шкаф находится в подвальной лаборатории без окон, которая отделена от остальных лабораторий несущими железобетонными стенами толщиной 0,35 м. Во всех экспериментах на расстоянии от 5 до 15 м генераторы были установлены в соседней лаборатории, отделенной двумя такими стенами. В экспериментах на расстоянии более 15 м между генератором и сенсорами находились множественные железобетонные конструкции. Для устойчивого определения сигнала в этих экспериментах генератор работает с периодом в 4 ч: 1 ч — включение и 3 ч — перерыв, после чего весь цикл повторяется.

Детекторы демонстрируют три разных типа поведения при воздействии. Первый тип реакции, обозначенный как T1, — это явно видимый скачок из периодического или непериодического стационарного состояния (рис. 7). Второй тип реакции, обозначенный как T2, — это изменение тренда без существенного скачка. В заключение, детекторы могут изменять частоту или форму осцилляции без изменения тренда, этот тип обозначен как T3.

Вследствие переходных процессов в слое Гуи—Чепмена сенсоры периодически теряют свою чувствительность. Поэтому при воздействии на детектор не все девять сенсоров демонстрируют реакцию и необходимо рассмотреть вопрос о статистической значимости показаний сенсоров. Представим значение сенсора как 1, если реакция сенсора совпала с временем воздействия, 0, если не совпала. В контрольной группе A рассмотрим случай идеальных сенсоров (в отсутствие воздействия все значения равны нулю, группа A1) и наличие некоторого случайного процесса в одном из сенсоров, который может случайным образом ''угадать" правильное время воздействия (одно значение равно 1, группа A2). Как правило, наличия одного "неправильного" сенсора в группе A2 достаточно, поскольку в случае потери чувствительности сенсоры демонстрируют поведение из группы A1. В группе Б рассмотрим некоторые комбинации: 3 из 9 значений сенсоров — правильные, 4 из 9, 6 из 18, 8 из 18 — правильные и т. д. Теперь проведем U-тест по методу Манна и Уитни для

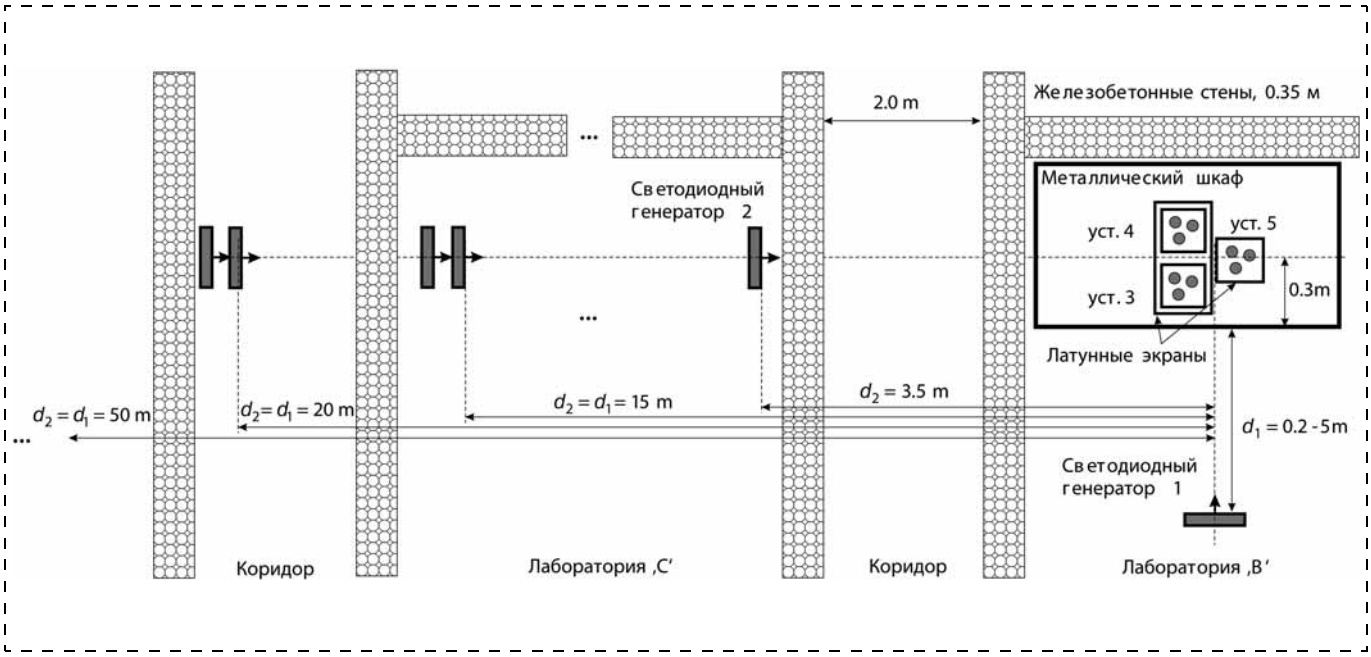

Рис. 6. Общая схема экспериментов. Лаборатории B и C без окон находятся в подвале здания, толщина несущих железобетонных стен около 35 см. Каждая из сенсорных установок № 3, 4 и 5 имеет два ЭМ экрана из латуни и два тепловых экрана из натуральной шерсти

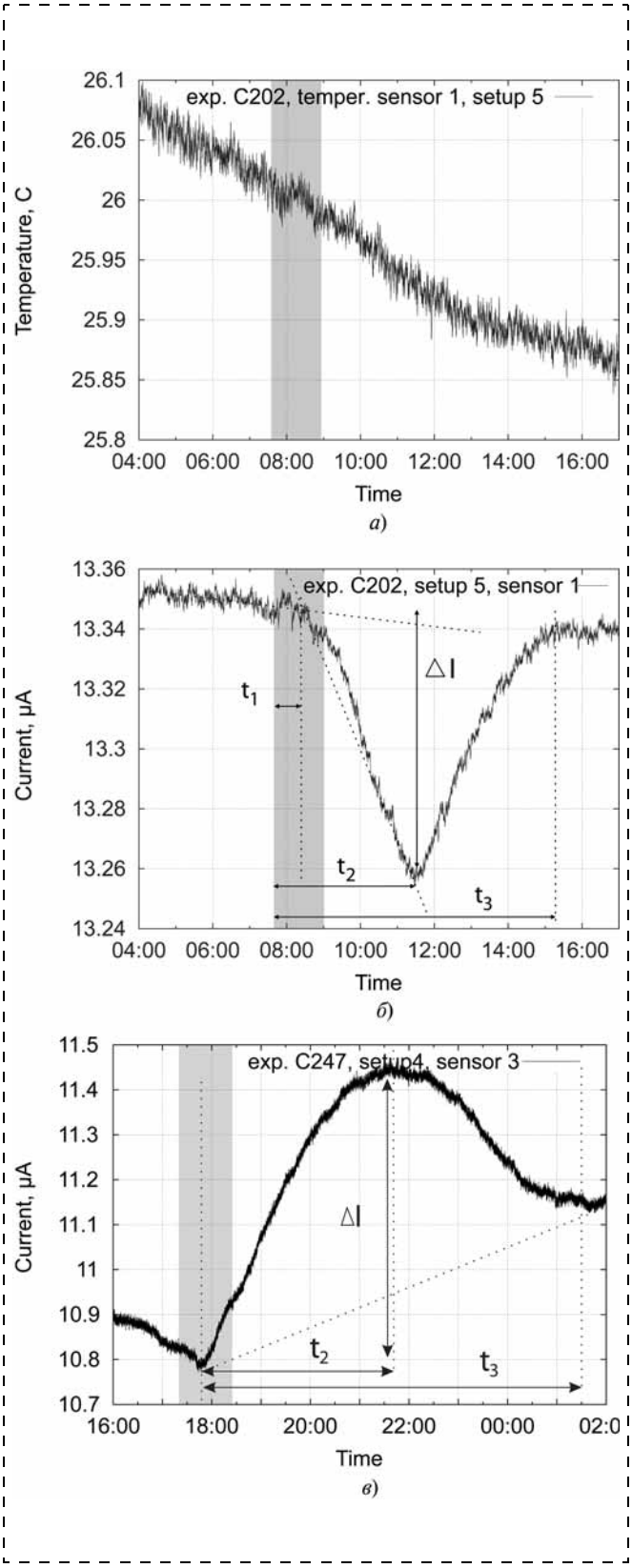

Рис. 7. Измерение параметров реакции детектора на воздействие генератора. Серой полосой показано время действия генератора, расстояние между генераторами и детекторами 0,5 ± 0,15 м:
а — изменения температуры во время эксперимента С202; *б* — эксперимент С202 со светодиодным генератором; *в* — эксперимент С247 с лазерным генератором. Отчетливо видны скачки тока во время воздействия генератора — этот тип реакции сенсоров обозначен как Т1

Таблица 1

Результаты U-теста для групп А и Б

Группа Б	Группа А1		Группа А2	
	U-тест (z)	Значимость	U-тест (z)	Значимость
3 : 6	−1,844	0,065	−1,102	0,270
4 : 5	−2,204	0,028	−1,534	0,125
5 : 4	−2,557	0,011	−1,944	0,052
6 : 12	−2,646	0,008	−1,581	0,114
7 : 11	−2,907	0,004	−1,898	0,058
8 : 10	−3,162	0,002	−2,201	0,028

комбинаций из групп А и Б (табл. 1). Таким образом, показания сенсоров являются статистически значимыми относительно соответствующего случайного процесса, как минимум с $\alpha = 0{,}058$ (двухсторонний), если около 40—45 % всех сенсоров демонстрируют реакцию. Случаи с 3 из 9 и 4 из 9 оговариваются отдельно, поскольку они значимы относительно потери чувствительности, но не значимы относительно случайных помех.

3. Калибровка светодиодного генератора

При калибровке генератора используют следующие параметры реакции Т1, N/M — это число датчиков из общего числа M, которые показали реакцию. Для полученного сигнала оценивают три временных параметра t_1, t_2, t_3 — время нарастания и уменьшения пика и ΔI — разница в токе. Одновременно анализируют значения температурного сенсора и акселерометра на предмет изменения значений до, во время и после эксперимента. Рассматривают только каузальные изменения (т. е. во время эксперимента). Из 6 или 9 работающих сенсоров отбирают группу из 3 сенсоров, которые показали в данном замере максимальный видимый результат. Их параметры анализируют дальше. Ввиду длительного времени релаксации возможно проводить только несколько замеров в день. Для уменьшения шума данные, поступающие из микроконтроллера, сглаживает усредняющий фильтр в скользящем окне длиной в 1 мин.

Результаты проведенных экспериментов по калибровке генератора собраны в табл. 2. Из имеющихся данных следует, что при увеличении частоты первичной модуляции (от 55,5 до 333,3 кГц) не происходит увеличения воздействия, наоборот, воздействие ниже по ряду параметров. Возможно это связано с необходимостью уменьшения опорного напряжения с 29 до 7 В. Существенными параметрами являются время активации светодиодов t_a, частота первичной модуляции f_f и прямое напряжение на светодиодах V_L. В целом методика оценки

Таблица 2

Параметры светодиодного генератора и результаты калибровки. Расстояние между генератором и сенсорами 0,5 ± 0,15 м в лаборатории В, обозначения типа s5s1 (setup 5, sensor 1) указывают на номер установки и номер сенсора, которые продемонстрировали реакцию

N	t_a, мкс	Генератор			Экран	N/M	Детектор 1			Детектор 2			Детектор 3		
		f_f, кГц	f_s, Гц	V_L, В			t_1, t_2, t_3, мин	I, ΔI, мкА	Δt, °C	t_1, t_2, t_3, мин	I, ΔI, мкА	Δt, °C	t_1, t_2, t_3, мин	I, ΔI, мкА	Δt, °C
C196	1	2,9	—	29	пл.[1]	0/9									
C198a	1	2,9	—	29	пл.[1]	0/9									
C198b	1	2,9	—	29	пл.[1]	0/9									
C198c	1	2,9	—	29	–	4/9	s5s1 30, 180, —	13,6, 0,15	0,000	s4s1 30, 100, —	10,0, 0,2	0,01	s4s2 40, 60, —	13,1, 0,02	0,01
C198d	1	2,9	18	29	—	0/9									
C198e	1	2,9	18	29	—	0/9									
C198g	1	2,9	18	29	—	0/9									
C200	1	2,9	18	29	—	0/9									
C201	0,3	55,5	—	29	—	6/9	s5s1 0, 50, 120	13,4, 0,05	0,05	s5s3 5, 120, –	11,6, 0,6	0,005	s4s2 0, 60, –	10,6, 0,04	0,04
C202	0,3	55,5	—	29	—	6/9	s5s1 40, 220, 430	13,6, 0,1	−0,001	s4s1 0, 200, –	10,2, 0,1	−0,003	s4s2 40, 220, –	13,6, 0,7	−0,001
C203	0,3	333,3	—	7,3	—	3/9	s5s1 40, 90, 180	13,3, 0,04	0,000	s5s2 40, 60, 90	6,8, 0,03	0,000	s4s1 5, 60, 90	10,2, 0,02	−0,001
C204	0,3	333,3	—	7,3	—	4/9	s5s1 40, 280, –	13,3, 0,1	−0,003	s5s2 30, 90, 180	6,8, 0,1	-0,003	s5s3 30, 200, –	10,6, 0,2	−0,003
C205	0,3	55,5	12	29	—	7/9	s5s2 0, 90, 150	6,8, 0,2	−0,05	s4s2 0, 90, —	13,7, 0,4	−0,03	s4s2 0, 80, –	10,25, 0,1	−0,03
C208	0,3	55,5	12	29	—	8/9	s5s1 5, 240, 480	13,0, 0,25	−0,01	s5s2 10, 240, 300	6,78, 0,32	−0,01	s5s3 10, 240, 360	10,3, 0,8	−0,01

[1] В качестве экрана использовалась многослойная поперечно-продольная структура, изготовленная из биосовместимого полимера, однако эти эксперименты не получили своего завершения в этой работе.

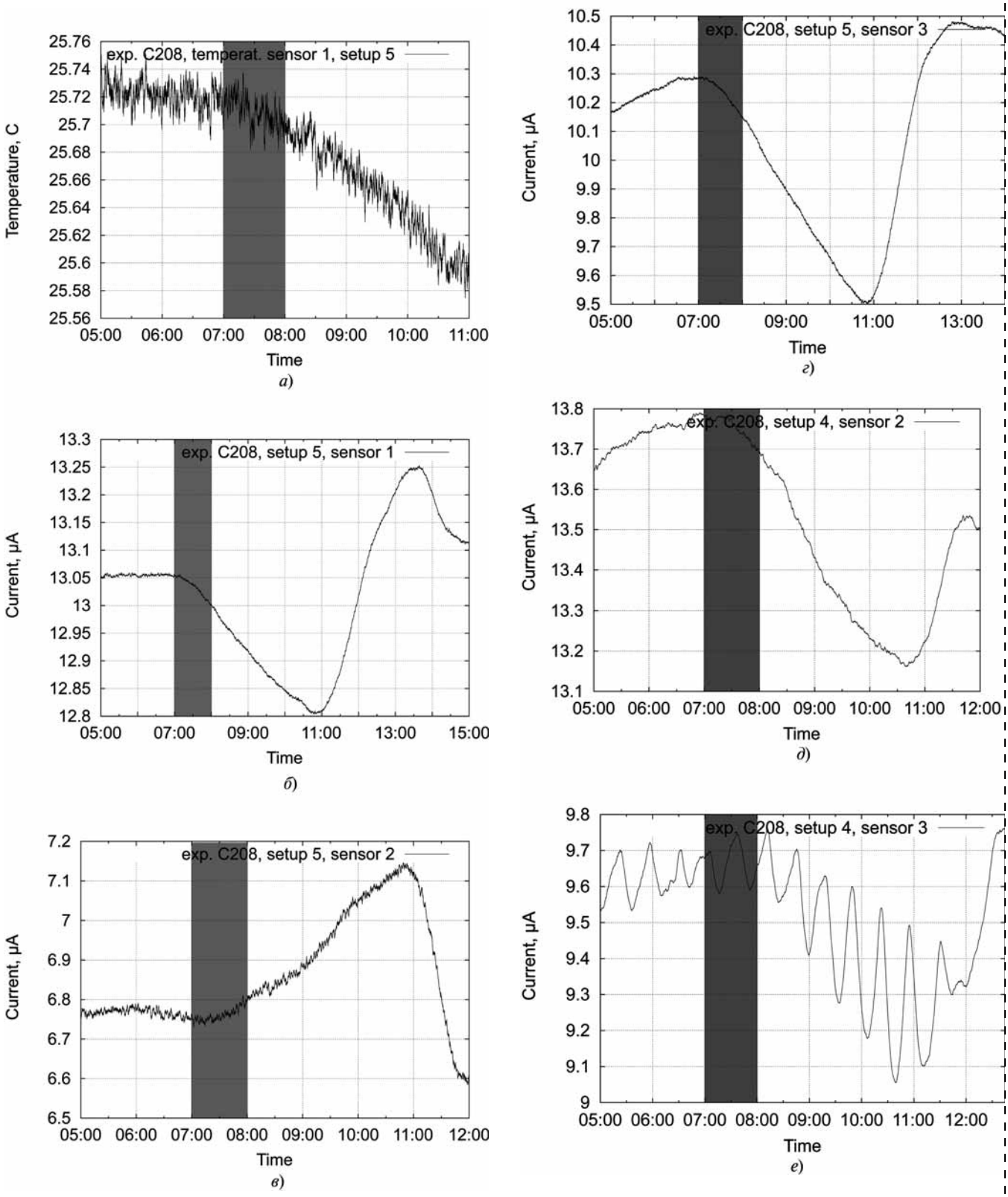

Рис. 8. Эксперимент С208, измерение параметров реакции детектора на воздействие генератора:
а — значение температуры во время эксперимента; *б—е* — показания токовых сенсоров. Серой полосой показано время действия генератора; расстояние между светодиодным генератором и детекторами 0,5 ± 0,15 м

параметров N/M, t_1, t_2, t_3, I, ΔI кажется достаточно обоснованной и может применяться для дальнейших опытов.

Для сравнения с дальнейшими экспериментами на рис. 8 показаны результаты эксперимента С208, полученные на расстоянии 0,5 ± 0,15 м между светодиодным генератором и детекторами.

Заключение

В части 1 этой работы была продемонстрирована конструкция сенсоров на ДЭС и светодиодных/лазерных генераторах и методология проведения экспериментов. В качестве калибровочных экспериментов было проведено несколько замеров на расстоянии 0,5 м. Необходимо подчеркнуть, что сенсоры с помощью нескольких экранов тщательно изолированы от светодиодных генераторов, т. е. мы исключаем электромагнитный (в том числе световой), температурный, акустический или механический способ взаимодействия на том уровне, который позволяют измерить примененные измерительные приборы. В дальнейшем при увеличении расстояния, как будет показано в части 2 этой работы и в работе [25], вопрос этих взаимодействий также отпадает в силу большого расстояния между сенсорами и генераторами. Однако мы наблюдаем реакцию сенсоров при определенных параметрах светодиодного и лазерного генераторов. В части 2 этой работы будут продемонстрированы результаты проведенных экспериментов и сделаны более детальные выводы на их основе.

Мы хотели бы высказать признательность за ценные советы в процессе подготовки и анализа экспериментов, а также за обсуждение общей природы наблюдаемого феномена А. В. Боброву, С. А. Васильеву, В. Т. Шкатову, Ю. П. Кравченко, В. А. Жигалову и А. Савсуненко.

Список литературы

1. **Von der Emde G., Schwarz S., Gomez L., Budelli R., Grant K.** Electric fish measure distance in the dark // Nature. 1998. V. 395. P. 890—894.

2. **Sim M., Kim D. E.** Electrolocation with an electric organ discharge waveform for biometric application // Adaptive Behavior. 2011. V. 19 (3). P. 172—186.

3. **Kernbach S., Thenius R., Kernbach O., Schmickl T.** Re-embodiment of honeybee aggregation behavior in artificial micro-robotic system // Adaptive Behavior. 2009. V. 17 (3). P. 237—259.

4. **Levi P., Kernbach S.** (editors). Symbiotic Multi-Robot Organisms: Reliability, Adaptability, Evolution. Springer Verlag, 2010.

5. **Kernbach S., Kernbach O.** Collective energy homeostasis in a large-scale micro-robotic swarm. // Robotics and Autonomous Systems, DOI 10.1016/j.robot.2011.08.001. 2011. V. 59. P. 1090—1101.

6. **Kernbach S.** (editor). Handbook of Collective Robotics: Fundamentals and Challenges. Pan Stanford Publishing, Singapore, 2012.

7. **Kernbach S., Dipper T., Sutantyo D.** Multi-modal local sensing and communication for collective underwater systems // In Proceedings of the 11th International Conference on Mobile Robots and Competitions, ROBOTICA11. 2011. P. 96—101.

8. **Dipper T., Gebhardt K., Kernbach S., von der Emde G.** Investigating the behavlour of weakly electric hish with a fish avatar // In International Workshop on Bio-inspired Robots, 2011.

9. **Бобров А. В.** Взаимодействие спиновых полей материальных объектов (A. V. Bobrov. Interaction between spin fields of material objects) // Материалы Международной научной конференции. Хоста, Сочи, 25—29 августа, 2009. С. 76—86.

10. **Бобров А. В.** Модельное исследование полевой концепции механизма сознания (A. V. Bobrov, Investigating and field concept of consciousness). Орел: ОрелГТУ, 2006.

11. **Бобров А. В.** Реакция двойных электрических слоев на воздействие торсионного поля (A. V. Bobrov. Reaction of double electrical layer on torsion field) // ВИНИТИ N 1055-В97, 1997.

12. **Stenschke H.** Polarization of water in the metal/electrolyte interface // Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electwchemistry. 1985. V. 196 (2). P. 261—274.

13. **Gruen D. W. R., Marcelja S.** Spatially varying polarization in water, a model for the electric double layer and the hydration force // J. Chem. Soc, Faraday Trans. 2. 1983. Vol. 79. P. 225—242.

14. **Belaya M. L., Feigel'man M. V., Levadnyii V. G.** Structural forces as a result of nonlocal water polarizability // Langmur. 1987. N 3 (5). P. 648—654.

15. **Lyklema J.** Fundamentals of Interface and Colloid Science. Academic Press, 2005.

16. **Kernbach S.** Replication attempt: Measuring water conductivity with polarized electrodes // Journal of Scientific Exploration. 2013. Vol. 27 (1). P. 69—105.

17. **Spillner F.** Vier-elektroden-konduktoinetrische analyse (4-ek-analyse) // Chemie Ingenieur Technik. 1957. N 29 (1). P. 24—27.

18. **Kirkham D., Taylor G. S.** Some tests of a four-electrode probe for soil moisture measurement // Soil Sci. Soc. Am. Proc. 1949. N 14. P. 42—46.

19. **Bristow K. L., Kluitenberg G. J., Goding C. J., Fitzgerald T. S.** A small multi-needle probe for measuring soil thermal properties, water content and electrical conductivity // Computers and Electronics in Agriculture. 2001. N 31 (3). P. 265—280.

20. **Orion** conductivity theory, orion products — the technical edge. Technical report. URL: http://www.thermo.com/eThermo/CMA/PDFs/Articles/articlesFile_11377.pdf.

21. **Hunter L., Gordon J., Peck S., Ang D., Lin J.-F.** Using the earth as a polarized electron source to search for long-range spin-spin interactions // Science. 2013. V. 339 (6122). P. 928—932.

22. **Vedral V.** Quantifying entanglement in macroscopic systems // Nature. 2008. V. 453 (7198). P. 1004—1007.

23. **Шипов Г. И.** Теория физического вакуума. М.: НТ-центр. 1993.

24. **Kernbach S.** On high-penetrating LEDs emission on short and middle ranges // In Proc. of the Int. Conf. Torsion fields and Information Interactions. Moscow, 2012. P. 98—114.

25. **Кернбах С., Замша В., Кравченко Ю.** Дальние и сверхдальние приборные взаимодействия // Журнал формирующихся направлений науки, 1 (принято к публикации), 2013.

26. **Акимов А. Е.** Эвристическое обсуждение проблемы поиска новых дальнодействий. EGS-концепции. М.: Препринт / Межотрасл. науч.-техн. центр венчур. нетрадиц. технологий. 1991. N 7А. P. 63.

27. **Reddish V. C.** The Field of Rotating Masses. Makar Publishing, Edinburg, 2010.

УДК 621.3.049.77.002

И. В. Прокофьев, ст. науч. сотр.,
e-mail: ip_icnt@mail.ru,
В. С. Суханов, нач. лаб., e-mail: vs@tcen.ru,
НПК "Технологический центр" МИЭТ,
Зеленоград, Москва

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ МАГНИТОИНЕРЦИАЛЬНЫХ И СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ ДЛЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТА

Поступила в редакцию 19.11.2012

Объектом исследования являются методы создания интегрированных и комплексированных магнитоинерциальных и спутниковых навигационных систем, созданных на основе микроэлектромеханических (МЭМС) и наноэлектромеханических (НЭМС) систем для решения задач интеллектуального мониторинга и управления транспортом.

Ключевые слова: *инерциальная система, спутниковая система навигации, микромеханические системы, комплексирование данных, интеллектуальные системы навигации*

Практически все известные на сегодняшний день методы обработки данных бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) были разработаны для применения в авиации и космических аппаратах. Появление МЭМС- и НЭМС-технологий позволяют перенести известные дорогостоящие решения в сегмент массового спроса — наземный автомобильный транспорт, где цена выходит на передний план. Однако специфика движения наземного транспорта не позволяет в полной мере воспользоваться готовыми решениями и требует проведения дополнительных исследований в области создания новых методов интегрирования и разработки оригинальных алгоритмов комплексирования.

В настоящее время наибольший интерес представляет комплексирование данных от датчиков угловой скорости, датчиков напряженности магнитного поля и акселерометров, поскольку практически любой маневр автомобиля вызывает изменение сигнала сразу на всех трех типах сенсоров. При этом помехи, связанные с природой отдельного сенсора, минимизируются за счет анализа сигнала на двух других. Следует также обратить внимание на шумовибрационную корреляцию при комплексировании данных от акселерометра и электретного микрофона.

Начиная с 2004 г. широкое распространение получили системы, использующие в системах навигации магниторезистивные датчики. Родоначальником стала фирма *Honeywell*, создавшая систему *GyroDRM,* в состав которой помимо приемника *GPS* вошли тонкопленочные датчики магнитного поля и микроэлектромеханические гироскопы. Ошибка навигации в условиях отсутствия сигнала со спутника (мегаполис) — 1 метр на 100 метров пути — отличный результат! — это ускорило развитие магнитоинерциальных систем ориентации, лучшим образцом которых на сегодняшний день является модуль DRM4000 фирмы *Honeywell*, появившийся в продаже в феврале 2009 г. и обеспечивающий определение местоположения человека [1].

В 2012 г. на рынке появились датчики акселерометров и магнитного поля в интегральном исполнении LSM333D фирмы *STM* [2], *AnalogDevices* выпустила трехосевой модуль ADIS16480 [3], включающий датчики угловых скоростей, акселерометры и магнитометры, таким образом интерес фирм-разработчиков к интегральным комплексным системам неуклонно возрастает. Одна из причин — быстрый рост спроса на интеллектуальные системы мониторинга, в состав которых кроме спутниковой системы навигации (ССН) входят инерциальные микросистемы, позволяющие повысить точность определения местоположения в условиях мегаполиса (многоуровневые развязки, продолжительные тоннели, подземные парковки и т. д.).

НПК "Технологический центр" последние 20 лет также занимается разработкой технологии изготовления тонкопленочных магниторезистивных датчиков и имеет большой опыт применения магниточувствительных сенсоров в различных информационно-измерительных системах [4—6]. Это позволило разработать систему интеллектуального

мониторинга и управления транспортом на базе комплексной магнитоинерциальной и спутниковой системы навигации, созданной на основе микроэлектромеханических (МЭМС) и наноэлектромеханических (НЭМС) систем в целях исследования устойчивости работы алгоритмов комплексирования.

Изготовленный макет навигационного комплекса позволяет получать информацию с датчиков напряженности магнитного поля, угловых скоростей и линейных ускорений, а также получать привязку к координатам с помощью GPS/ГЛОНАСС. Данная информация служит основой для разработки алгоритмов комплексирования и обработки данных, используемых для реализации навигационных комплексов различного применения.

Задача комплексирования сводится к задаче оценки весовых коэффициентов координат, полученных от трех различных источников: датчиков БИНС, модуля GPS/ГЛОНАСС и математически вычисленного местоположения на основе предыдущих данных и законов движения автомобиля. Значения весовых коэффициентов являются функцией режима и условий движения, качества сигнала от спутников и ошибки определения координат на предыдущем шаге.

Применение специализированных алгоритмов обработки информации позволяет эффективно снижать погрешность измерений датчиков БИНС, а также достаточно точно определять координаты при полном отсутствии данных от спутниковых систем навигации в течение некоторого промежутка времени, зависящего от характера движения транспортного средства.

В результате проведенных исследовательских испытаний макета в целях проверки алгоритмов комплексирования магнитоинерциальных и спутниковых навигационных систем были получены следующие результаты:

- многократное снижение, а в некоторых случаях — полное отсутствие интегральной ошибки микрогироскопов, созданных на основе датчиков угловых скоростей;
- безошибочное определение факта остановки и начала движения транспортного средства;
- повышение частоты обновления навигационных данных с 1 до 200 Гц без потери точности вычисления параметров движения.

На рис. 1 (см. четвертую сторону обложки) показана траектория движения, вычисленная инерциальной системой без магнитных датчиков (синий цвет) и магнитоинерциальной системой (красный цвет). Очевидно отсутствие интегральной ошибки курсового угла при продолжительном прямолинейном движении автомобиля.

На рис. 2 (см. четвертую сторону обложки) показана распространенная ситуация на парковке вблизи промышленного здания (число видимых спутников — 2—3) — красная траектория — данные только ССН, синяя — ССН с магнитоинерциальной системой.

Применение разработанных алгоритмов в интеллектуальных навигационных системах позволит создать новый класс высокоточного автоматизированного оборудования для роботизации управления транспортными средствами.

Работа выполнена в рамках федеральной целевой научно-технической программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники на 2007—2013 годы (Государственный контракт от 19 апреля 2011 г. № 16.513.11.3058).

Список литературы

1. **Honeywell** Sensor Products uPoint / Solid State Electronics Center. URL:www.magneticsensors.com. DRM4000, Honeywell. (2009).

2. **STMicroelectronics.** Сайт фирмы. URL:http:ww.st.com

3. **Analog Devices.** Сайт фирмы. URL:http:www.analog.com

4. **Галушков А. И., Голишников А. А., Прокофьев И. В., Суханов В. С.** Исследование технологии изготовления интегральных магниторезистивных преобразователей для устройства регистрации магнитных полей // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2007. № 1. С. 81—83.

5. **Касаткин С. И., Васильева Н. П., Муравьев А. М.** Многослойные тонкопленочные магниторезистивные элементы. М.: Изд. ИПУ РАН. 2001. С. 57—61.

6. **Дягилев В. В., Касаткин С. И., Муравьев А. М., Резнев А. А., Сауров А. Н.** Однослойные анизотропные магниторезистивные датчики магнитного поля и тока с наклонными полосками // Микроэлектроника. 2007. Т. 36, № 2. С. 98—103.

УДК 621.382:612.82

И. И. Абрамов, д-р физ.-мат. наук, проф.,
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь,
e-mail: nanodev@bsuir.edu.by

МОЗГ — ОБЪЕКТ ОРГАНИЧЕСКОЙ ГИБРИДНОЙ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ, ИЛИ ВЗГЛЯД СО СТОРОНЫ. ЧАСТЬ IV

Поступила в редакцию 24.07.2012

Приводится новая интерпретация функционирования мозга — объекта органической гибридной наноэлектроники, созданного Природой. Наиболее близкий аналог искусственной электроники — интегральная схема микро- и наноэлектроники. Проводится сопоставление нейронных цепей мозга и интегральных схем и устанавливаются их основные различия. Показывается, что предложенная интерпретация и ее следствия позволяют не только более глубоко разобраться в принципах функционирования мозга, но и предложить перспективный комплексный подход его дальнейшего исследования, основанный на многоуровневом моделировании в сочетании с экспериментальными методами. В части IV дается ответ на вопрос: "А что же дальше?".

Ключевые слова: *мозг, наноэлектроника, электронная интерпретация*

А что же дальше?

Можно выделить очень много интересных проблем и задач, связанных с мозгом. Здесь их все рассмотреть просто невозможно. Поэтому остановлюсь кратко лишь на некоторых комплексах таких проблем и задач.

О непосредственном исследовании самого мозга. Ключевые проблемы такого исследования выделяли многие специалисты. Отмечу лишь "две центральные задачи физиологии" В. Маунткастла [1]. Следуя этому выдающемуся нейрофизиологу, на основе анализа литературы и проведенного рассмотрения также выделю два главных направления (проблемы) дальнейшего изучения самого мозга:

1) необходимо разобраться с основными деталями формирования и функционирования локальных нейронных цепей (условно *микроуровень* исследования);

2) необходимо понять как происходит инициация и управление различных мыслительных процессов, какие при этом структуры мозга функционируют и в какой последовательности (условно *макроуровень* исследования).

Говоря о первой проблеме, конечно же, сделано немало, однако, как свидетельствуют современные данные нейрофизиологии, остается еще очень много неясностей [2]. Вторая проблема не менее захватывающая, так как необходимо разобраться в сложнейшей кооперативной деятельности различных подсистем мозга и в то же время самостоятельности их функционирования, т. е. в этом своеобразном "великом оркестре", включая, конечно же, "дирижера". В свете рассмотренного многоуровневого подхода к моделированию мозга в рамках предложенной электронной интерпретации его работы первая проблема связана с нижними иерархическими уровнями, а вторая — с верхними.

О контактных системах "мозг — искусственный объект", " мозг — искусственный объект — мозг". Данному, по сути дела, вопросу посвящено большое число публикаций, включая научно-фантастические и серьезные научные работы. Достаточно отметить фундаментальные учения великих русских физиологов Ивана Михайловича Сеченова и Ивана Петровича Павлова о безусловном и условном рефлексах [3, 4]. В связи с этим остановлюсь лишь на наиболее важных для последующего результатах.

Прежде всего вспомним исследования по электрическому раздражению мозга (ЭРМ) с помощью техники вживленных электродов [5—7]. Уже отмечалось, что с помощью ЭРМ можно вызвать самые различные реакции, в том числе психические.

Большой эффект в свое время вызвали пионерские опыты Х. Дельгадо с коллегами, основанные на методе ЭРМ, с помощью "стимосиверов" — миниатюрных радиоэлектронных устройств "для передачи и приема радиосигналов, направленных к мозгу и от него" [5]. Опыты проводили в основном на обезьянах, причем и с применением ЭВМ. Эксперименты подтвердили "возможность установления прямой связи между мозгом и вычислительной

машиной, минуя органы чувств, а также возможность автоматического обучения путем прямой подачи сигналов на определенные структуры мозга без участия сознания" [5]. Не меньшее впечатление в свое время вызвали кадры, на которых "удалось неоднократно продемонстрировать, что раздражение мозга подавляет агрессивность быка[1]... и его можно внезапно остановить в самый разгар атаки" [5].

И, тем не менее, некоторые поведенческие акты не удалось получить [5—7]. Пионеры данных исследований связывали это с грубостью метода. Так, Х. Дельгадо писал [5]: "Электрическое раздражение мозга — это, по сути дела, довольно грубый метод". Действительно, если придерживаться принятой интерпретации, то для того, чтобы возникли некоторые сложные поведенческие акты необходимо, по-видимому, два условия. Во-первых, воздействие на строго определенную точку (место) нейронной цепи, а возможно и на комбинацию точек в пространстве и во времени, причем сигналом (сигналами) определенной формы (сила тока, частота и т. п.). Во-вторых, использование более совершенных электродов, например в виде нанопроволок, так как с их помощью можно будет подключиться даже к определенной точке отдельного нейрона, т. е. к требуемому месту элемента электрической цепи[2] первого типа (см. ранее). Во всяком случае реальный прогресс может быть достигнут в этих направлениях. В то же время известно [7], что в применяемой микроэлектродной технике, как правило, одновременно возбуждаются большие массивы нейронов. В связи с этим удивление вызывает другое. Как вообще были получены достаточно сложные поведенческие акты? То, что они наблюдались в эксперименте, свидетельствует в пользу того, что, с одной стороны, мозг не столь "утонченное устройство" как считается многими[3], а с другой, — скорее всего схемы многоуровнего моделирования, основанные даже на не очень детальных моделях, включая описанную выше схему, позволят получить весьма убедительные результаты.

Несмотря на относительную грубость метода ЭРМ на основе микроэлектродной техники, с его помощью уже достигнуты существенные результаты в медицине. Достаточно отметить кохлеарные импланты у потерявшего слух человека, которые с успехом используют в целях его восстановления и "представляют собой неопровержимое свидетельство, живой пример интеграции людей и компьютеров" [9]. Данный успех связан с заменой утраченных сенсорных волосковых клеток кохлеарными имплантами, т. е. достаточно высокой степенью локализации воздействия в этом случае, что косвенно подтверждает целесообразность выполнения отмеченных двух условий.

В связи с изложенным выше, автор полагает, что со временем будет возможным считывать мысль человека и воспринимать ее людьми с применением искусственных объектов (устройств). Тут, конечно же, встретится немало проблем. Одна из очень интересных будет связана с отличиями в кодировании информации в мозге у различных людей, которые определяются спецификой (индивидуальностью) нейронных цепей (см. ранее). Это проблема совместимости, которая подобна и для подчерка людей[4]. Думаю, что "помощь" в рассматриваемом случае окажут не только искусственные устройства, но и непосредственно мозг принимающего информацию человека вследствие его важнейшего свойства — пластичности, т. е. потребуется определенный период освоения, адаптации, научения к ее восприятию таким образом. По-видимому, не менее сложной проблемой по сравнению с передачей и восприятием информации от мозга к мозгу будет проблема ее прямой записи в мозг. Для этого потребуется создание устройств, преобразующих различные сигналы (оптические, звуковые, химические и др.) сразу в коды мозга. И, тем не менее, автор считает, что и эти проблемы будут решены. По изложенным причинам создание Всемирной сети разума [9] мне не кажется фантастикой, а вполне реальным проектом. И здесь значительный прогресс может быть достигнут с применением наноэлектроники, нанофотоники, наноматериалов и нанотехнологий. Началом этого процесса можно считать использование нанопроволок и оптогенетики [9].

В заключение краткого рассмотрения выделенных двух комплексов проблем и задач отмечу, что это разделение весьма условно, так как настоящий успех в исследовании мозга невозможен без учета его взаимодействия с другими объектами.

О создании искусственных объектов, эквивалентных мозгу. Этот вопрос наиболее популярен в литературе по кибернетике, искусственному ин-

[1] Речь идет о "быках торо — животных, злобность которых специально повышали с помощью отбора на протяжении многих поколений" [5].

[2] Очевидно, что более или менее строгая электрическая модель даже отдельного нейрона будет представляться достаточно сложной распределенной эквивалентной электрической схемой. Поэтому речь и идет об определенной точке нейронной цепи.

[3] Вероятно в таких исследованиях реализуется хорошо известное явление доминанты [8].

[4] Не исключено, что различие в кодировании как раз наглядно проявляется в подчерке людей.

теллекту. Очень хорошо динамику взглядов по данному вопросу отражает следующая фраза М. Арбиба [10]: "... многие различия между человеком и машиной, которые до последнего времени казались очень существенными, являются только количественными". Хотя это в целом и так, однако, как было показано выше, между ИС и мозгом все же существуют весьма серьезные, качественные отличия. Одно из самых существенных — возможность гибкой модификации электрических цепей первого типа. Природа создала очень "хитрую" электронику — оригинальное приемно-передающее[1] устройство в одном объекте — шедевр на основе взаимодействия электрических и химических процессов. Следует признать, что, к сожалению, строго доказать возможность создания аналогичных искусственных объектов сейчас просто невозможно.

И тем не менее можно привести следующие дополнительные аргументы к сказанному многими оптимистами в рассматриваемой области (см., например, [9, 11, 12]). В соответствии с изложенным ранее мыслительная деятельность, судя по всему, — суть макроскопические коллективные явления в нелинейных электрических цепях первого типа. Если это так, то уместно вспомнить слова одного из основателей синергетики — выдающегося немецкого ученого Г. Хакена, а именно [13]: "...с абстрактной точки зрения синергетики кооперативные эффекты могут приводить к такому же макроскопическому поведению систем с совершенно различными макроскопическими компонентами. Существенны лишь параметры порядка". На основе этих двух посылок можно сделать далеко идущий вывод о том, что системы типа мозга могут быть реализованы и искусственно! Не исключено, что это допустимо осуществить необязательно на элементах, подобных выбранным Природой, но и на других. Возможно, что отмеченные в работе отличия между электрическими цепями первого и второго типов помогут прогрессу в данной области.

Рассмотренное направление создания искусственных объектов будет связано с технологиями, основанными на процессах типа "сверху-вниз" и "снизу-вверх" или их комбинации. Во всяком случае об этом свидетельствует положительный опыт в области микро- и наноэлектроники, нанотехнологий (см., например, [14, 15]).

Возможен, однако, и качественно иной, гораздо более эффективный подход, который автор в работе [14] назвал "от имеющегося". Сущность его заключается в модернизации или модификации естественных биологических процессов. Необходимо отметить, что данный подход с успехом неявно и давно используется в медицине. Примерами могут служить многочисленные лекарства, улучшающие работу мозга, кохлеарные импланты, возвращающие слух человеку, и др. Можно в определенном смысле и повторить (точнее обхитрить) то, что сделала Природа, т. е. сделать такую же точно систему как человек, включая, естественно, мозг. Это клонирование человека. Но надо ли это? (см. далее).

Здесь уместно кратко остановиться на другой грандиозной проблеме — квантовых компьютерах. Динамику отношения к ней можно кратко охарактеризовать так: "от эйфории к нарастающему пессимизму". Детально проблема рассмотрена в статьях выдающегося советского и российского ученого в области микро- и наноэлектроники — академика К. А. Валиева и его коллег [16, 17]. Поэтому здесь обращу внимание на одну серьезную проблему, которую упускают из виду. Так, рассматривая баллистический транспорт в нанотранзисторах [14], автор отмечал, что любое взаимодействие микрочастицы в соответствии с квантовой механикой можно интерпретировать как столкновение и оно будет иметь место даже в вакууме с постоянно рождаемыми и уничтожаемыми микрочастицами, т. е. фактически такой транспорт — полезная идеализация. Конечно же, это не является доказательством нереализуемости квантовых компьютеров в принципе, однако добавляет "ложку дегтя в бочку с медом". И тем не менее работы в этом направлении должны продолжаться. Тут я полностью согласен с профессором М. Б. Менским [18]. С одной стороны, из истории известно, что строгое доказательство невозможности вечного двигателя второго рода привело к созданию термодинамики — мощного раздела физики. С другой стороны, работа в этой области уже привела к очень интересным результатам в физике, математике, электронике и др. [16, 17]. Судя по всему, это еще одна, как минимум, "марафонская задача ", т. е. просто не надо надеяться на быстрый успех.

Несколько слов о тайнах мозга мифических, мистических и реальных, которые производят красивый эффект (см., например [19—24]). Действительно, автор в целом согласен с Д. Майерсом [20] в том, что в подавляющем числе случаев при более или менее детальном рассмотрении (проверке и т. п.) большинство этих "феноменов" оказывается просто "мыльными пузырями", т. е. некорректными сведениями, или объясняются случайными совпадениями. И тем не менее есть серьезные вопросы, связанные с экстрасенсорикой (см., например [23]),

[1] Как и в известных приемных устройствах (радиоприемнике, телевизоре и т. п.), здесь, кроме приема, конечно же, важны обработка и воспроизведение информации.

на которые даже удовлетворительных ответов пока нет. К этим вопросам наука должна относиться более аккуратно, хотя бы потому, что в противном случае число ее оппонентов увеличивается. Тем более, как уже отмечалось, при исследовании мозга есть объективная основа для спекуляций. И в то же время у автора не вызывает сомнения, что многие явления могут быть объяснены в рамках предложенной электронной интерпретации работы мозга, спецификой функционирования электрических (нейронных) цепей первого типа.

Заключение

Ранее отмечалось, что для строгого рассмотрения функционирования мозга необходимо анализировать очень сложный и своеобразный "запутанный клубок" большого числа физико-химических процессов, часто взаимосвязанных. Для того, чтобы попытаться его "распутать" и была предложена описанная последовательная электронная интерпретация. Насколько это удалось — судить читателю. Так же, как известные компьютерная [25, 26] и голографическая [27] метафоры[1] [26], предложенная интерпретация может быть в принципе названа электронной метафорой. В связи с этим необходимо также особо подчеркнуть, что автор не питает иллюзий. Мозг, конечно же, гораздо сложнее. Он просто архисложен. Рассмотренная проблема — это бесспорно, говоря образно, "Эверест науки". При его "штурме" могут быть важны любые, казалось бы на первый взгляд, детали. Поэтому уместно вспомнить следующие слова выдающегося английского физиолога Грея Уолтера [29]: "Когда говоришь о мозге, лучше исходить из положения, что незначащих явлений не существует". Подобной точки зрения придерживались многие исследователи мозга.

Хотя ряд воздействий на мозг может быть в принципе учтен в рамках предложенной интерпретации, например, температура, ионизирующее излучение, освещение, механическая перегрузка, атмосферное давление, однако предстоит сделать немало по разработке соответствующих моделей, так как тут еще очень много неясностей. Существуют значительные неясности и в самой нейрофизиологии, в частности, роли клеток нейроглии, которых гораздо больше (приблизительно на порядок), чем нейронов [30].

И тем не менее автор верит в полезность электронной метафоры, кроме уже отмеченного, по следующим причинам. Во-первых, она позволяет продвинуться вперед в понимании мозга. Задача становится более понятной хотя бы в целом. Во-вторых, с ее помощью перебрасывается вполне "естественный мост" к другим важным дисциплинам, в частности кибернетике (искусственный интеллект и др.) и искусственной электронике. А в них немало выдающихся достижений, имеющих огромную практическую ценность, которые могут быть полезны. И, наконец, в-третьих, возможно метафора позволяет наметить не самый прямой и простой, но на настоящий момент времени вполне реальный "маршрут штурма Эвереста науки". Ведь и штурм Эвереста, как известно, проводится поэтапно, т. е. многоуровнево.

В заключение необходимо сделать замечание об этических проблемах исследования мозга. Об этом писали очень многие ученые (см., например, [5, 7, 19, 31]). В связи с развитием наноэлектроники, нанофотоники, наноматериалов, нанотехнологий и нанонаук в целом эта проблема приобретает очень серьезный, международный характер[1]. Ведь даже атомное оружие может показаться "семечками" по сравнению с возможным "вторжением" в самую интимную сферу человека — его мозг. Ясно, что такого рода исследования по мозгу должны находиться под очень жестким международным контролем.

И все же хотелось бы закончить работу на оптимистической ноте словами выдающегося исследователя мозга — Х. Дельгадо, а именно [5]: "Но существует один аспект исследований на человеке, о котором обычно забывают, — это наш моральный и общественный долг развивать науку на благо человека".

Автор считает своим приятным долгом выразить искреннюю признательность моим ученицам Н. В. Коломейцевой, И. А. Романовой и И. Ю. Щербаковой за подготовку рукописей статей к печати.

Список литературы

1. **Эделмен Дж., Маунткасл В.** Разумный мозг. М.: Мир, 1981. 135 с.

2. **Николлс Дж. Г., Мартин А. Р., Валлас Б. Дж., Фукс П. А**. От нейрона к мозгу. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 672 с.

3. **Сеченов И. М.** Избранные произведения. М.: Гос. учеб.-педаг. изд-во Минист. просв. РСФСР, 1958. 416 с.

4. **Павлов И. П.** Лекции о работе больших полушарий головного мозга. М.: Изд-во АМН СССР, 1952. 288 с.

5. **Дельгадо Х.** Мозг и сознание. М.: Мир, 1971. 264 с.

6. **Пенфильд В., Робертс Л.** Речь и мозговые механизмы. Л.: Медицина, 1964. 264 с.

7. **Бехтерева Н. П., Гоголицын Ю. Л., Кропотов Ю. Д., Медведев С. В.** Нейрофизиологические механизмы мышле-

[1] Критика компьютерной и голографической метафор дана в книгах [28] и [26] соответственно.

[1] Здесь уместно отметить своевременную книгу по военным нанотехнологиям [32].

ния: Отражение мыслительной деятельности в импульсной активности нейронов. Л.: Наука, 1985. 272 с.
8. **Коган А. Б.** Основы физиологии высшей нервной деятельности: учебник. М.: Высш. шк., 1988. 368 с.
9. **Хорост М.** Всемирный разум. М.: Эксмо, 2011. 288 с.
10. **Арбиб М. А.** Мозг, машина и математика. М.: Наука, 1968. 224 с.
11. **Вулдридж Д.** Механизмы мозга. М.: Мир, 1965. 344 с.
12. **Хокинс Дж., Блейксли С.** Об интеллекте. М.: Вильямс, 2007. 240 с.
13. **Хакен Г.** Принципы работы головного мозга: Синергетический подход к активности мозга, поведению и когнитивной деятельности. М.: ПЕР СЭ, 2001. 351 с.
14. **Абрамов И. И.** Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и наноэлектроники // Нано- и микросистемная техника. 2006. ч. II. № 9. С. 26—36; 2007. ч. III. № 1. С. 36—47, ч. IV. № 2. С. 24—32, ч. V. № 3. С. 57—70, ч. VI. № 7. С. 10—24; 2009. ч. VII. № 7. С. 14—29, № 8. С. 7—23; 2010. ч. VIII. № 9. С. 27—37, № 10. С. 28—41, № 11. С. 29—42.
15. **Кобаяси Н.** Введение в нанотехнологию. Пер. с японск. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. 134 с.
16. **Валиев К. А.** Квантовые компьютеры и квантовые вычисления // УФН. 2005. Т. 175, № 1. С. 3—39.
17. **Валиев К. А., Вьюрков В. В., Орликовский А. А.** Кремниевая наноэлектроника: проблемы и перспективы // Успехи современной радиоэлектроники. 2010. № 6. С. 7—22.
18. **Менский М. Б.** Человек и квантовый мир. Фрязино: Век 2, 2005. 320 с.
19. **Лурия А. П.** Основы нейропсихологии. М.: Изд-во МГУ, 1973. 375 с.
20. **Майерс Д.** Психология. Минск: Попурри, 2006. 848 с.
21. **Бернацкий А. С.** Загадочный и парадоксальный мозг. Минск: Нар. асвета, 2011. 176 с.
22. **Каструбин Э. М.** Ключ к тайнам мозга. М.: Триада, 1995. 240 с.
23. **Феномен "Д"** и другие / Сост. Л. Е. Колодный. М.: Политиздат, 1991. 335 с.
24. **100** великих тайн сознания / Авт.-сост. А. С. Бернацкий. М.: Вече, 2011. 384 с.
25. **Нейман Дж.** Вычислительная машина и мозг. Кибернетический сб. Вып. 1. М.: Изд-во иностранной литературы, 1960. С. 11—60.
26. **Арбиб М.** Метафорический мозг. М.: Мир, 1976. 296 с.
27. **Прибрам К.** Языки мозга. М.: Прогресс, 1975. 464 с.
28. **Дрейфус Х.** Чего не могут вычислительные машины. Критика искусственного разума. М.: Прогресс, 1978. 336 с.
29. **Грей Уолтер.** Живой мозг. М.: Мир, 1966. 300 с.
30. **Хомутов А. Е., Кульба С. Н.** Анатомия центральной нервной системы: учеб. пособие. Ростов н/Д: Феникс, 2007. 315 с.
31. **Хомская Е. Д.** Нейропсихология. М.: Изд-во МГУ, 1987. 288 с.
32. **Альтман Ю.** Военные нанотехнологии. Возможности применения и превентивного контроля вооружений. М.: Техносфера, 2008. 424 с.

КОНКОРД
ГРУППА КОМПАНИЙ

Пост-релиз

Российские ВУЗы презентовали инновационные разработки в области нанотехнологий на международном Форуме и выставке

«ImagineNano 2013» в Испании

С 23 по 26 апреля 2013 года в Международном выставочном комплексе "Bilbao Exhibition Centre (BEC)" в городе Бильбао (Испания) состоялся специализированный Международный Форум "Imagine Nano 2013", основными тематическими направлениями которого стали биомедицина, наноматериалы, измерительные приборы, оптика, энергетика и высокопроизводительные вычисления

Российская Федерация была представлена на крупнейшем специализированном Международном Форуме единой национальной экспозицией, организованной Министерством образования и науки РФ. Основные цели, поставленные Российской Федерацией при участии в Форуме были достигнуты: Россия привлекла внимание зарубежных ученых к возможности реализации высокотехнологичных проектов на территории Российской Федерации, развила нанотехнологические сферы в университетах и научных лабораториях.

Среди российских участников были крупнейшие университеты и научно-исследовательские центры: *Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики, Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", Южный федеральный университет, Российский государственный технологический университет имени К. Э. Циолковского, Институт прикладной нанотехнологии, Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева, Российский научно-исследовательский институт сельскохозяйственных приборов* и другие.

23 апреля состоялась торжественная церемония открытия Форума, на которой выступили известные представители научных и политических кругов: выдающийся ученый, директор фонда Национального центра научных исследований Франции (Centre National de la Recherche Scientifique, CNRS), профессор Института оптики (Institut

d'Optique) **Ален Аспект**; член Кафедры теоретической физики (Theoretical Solid State Physics) **Джон Пендри**.

Российские университеты — участники выставочного стенда Министерства науки и образования РФ, принимали непосредственное участие в работе конференций, в секциях Промышленного Форума и в мероприятиях Brokerage Event. Представители Санкт-Петербургского электротехнического университета ЛЭТИ Татьяна Зимина и Анна Орлова выступили с докладами на Международных конференциях, посвященных различным сферам изучения нанотехнологий, организованных параллельно с Форумом. Татьяна Зимина выступила на конференции NanoBio & Med с докладом об устойчивости микробных клеток к антибиотикам, а Анна Орлова представила свою работу на тему: "Взаимодействие паров аммония с квантовыми примесями селенита кадмия/сульфида цинка в пористых матрицах" на конференции " Nanospain".

Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (МИРЭА) презентовал специально разработанный гибридный электронно-рентгеновский наномикроскоп, который позволит решать различные задачи нанотехнологий в физике, химии, геологии, материаловедении, биологии, медицине, экологии и фармакологии.

Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС" выставил на российский стенд малогабаритный интерференционный датчик линейного перемещения с субнанометровым разрешением; наноструктурированную ткань с грязеводоотталкивающими функциями, которая может использоваться для хранения любых точных приборов, проб в лесу и в поле; экстравазальный корректор; полиэфирную ткань, обработанную раствором солей металлов и обладающую повышенной электропроводностью и гигроскопичностью. Представитель МИСиС рассказал о том, как применение различных наноматериалов в качестве эффективных сорбентов, способствует защите здоровья человека, а также сохранению окружающей среды.

Московский государственный строительный университет (МГСУ) предоставил посетителям и участникам Форума возможность увидеть новейшую уникальную разработку — высокопрочный легкий наномоделированный бетон, который предназначен для строительства промышленных и гражданских зданий и уникальных сооружений. Представители МГСУ декларировали, что участие в Форуме «ImagineNano 2013» позволило установить профессиональные контакты с европейскими производителями бетона — Clusternanotech Bruno Cantarelli, Tomas A. Keenan, Jauier del Peal, Jerry Peszke, Krzystof Domarecki.

ЮФУ презентовал ряд разработок в области нанотехнологий: наноструктурированные, композиционные пьезоэлементы и возможные направления их применения, керамические элементы с наноразмерной структурой зерна, технологии формирования функциональных покрытий и наноразмерных структур для датчиков систем мониторинга окружающей среды, высокотемпературную смазку «Силкон», «Комол». Необходимо отметить, что Южный федеральный университет стал первым вузом Южного федерального округа, принявшим участие в Форуме ImagineNano, который на сегодня является самым крупным событием подобного рода в Европе.

Компания ОАО «РНИИ «Агроприбор» ознакомила гостей и участников выставки с новейшей уникальной разработкой — приборным чехлом из наноструктурированной ткани с грязеводоотталкиающими функциями, предназначенным облегчить защиту точных приборов при работе в природных условиях.

МГТУ им. А. Н. Косыгина представил всеобщему вниманию уникальную полиэфирную ткань, обработанную раствором солей металлов и обладающую повышенной электропроводностью и гигроскопичностью, для применения в медицинских учреждениях, а также для предприятий по производству шин и нетканых материалов.

За четыре дня работы Форума российские компании провели переговоры с представителями научных исследовательских центров, государственных университетов, промышленных компаний-производителей приборов и материалов в области нанотехнологий, медицинских лабораторий таких стран, как Испания, США, Канада, Германия, Корея, Франция, Австрия и др. Были заключены соглашения о совместном сотрудничестве в области научных разработок и обсуждены возможности дальнейшего взаимодействия.

Международный Форум "Imagine Nano 2013" позволил технологиям и инновациям открыть для себя новые бизнес-возможности. По итогам работы Форума было выявлено, что России удалось интенсифицировать международные научно-технические обмены, расширить двустороннее и многостороннее сотрудничество в научно-исследовательской сфере, повысить уровень взаимодействия российских ученых и исследователей с мировым профессиональным сообществом.

Контакты:
Ольга Аюпова, тел.: (495) 961-11-99, доб. 124, e-mail: o.ayupova@concordgroup.ru
Контакты для прессы:
Смирнова Дарья, тел: (495) 961-11-99, доб. 136, e-mail: d.smirnova@concordgroup.ru

CONTENTS

Chelpanov I. B., Kochetkov A. V. *Multi-Purpose Algorithms of Definition of Parameters of Components of the Signal of Micromechanical Gauges of Angular Speed and Acceleration* 2
Questions of planning, the organization and carrying out of tests of micromechanical gages and devices (MEMS), first of all micromechanical gyroscopes (ММГ), a part navigating systems and complexes of mobile objects are considered. Such gages are called by an action principle micromechanical, or microelectromechanical.
Keywords: micromechanical devices, tests, gages, gages of angular speed, acceleration gages

Zemlyannikov N. S., Danilova N. L., Pankov V. V., Sukhanov V. S., Gavrilov R. O., Mihaylov Yu. A. *Low Pressure Sensor Element Construction with Enhanced Overload Capacity* 8
This work shows the research results of tensoresistive pressure sensors with the complex-profiled silicon membrane which were produced using microelectronic technology. Also there are some constructive solutions for gauge pressure sensor elements which help to enhance the overload capacity.
Keywords: complex-profiled silicon membrane, pressure sensor element, gauge pressure sensor, overload capacity

Zablotsky A. V., Kuzin A. Yu., Mikheev N. N., Nikiforova N. A., Stepovich M. A., Todua P. A., Filippov M. N. *The Model of Quadratic Recombination of Minority Charge Carries in Direct Bandgap Semiconductors for Cathodoluminescence Identification of Electrophysical Parameters* 10
The possibility of the use of mathematical model of quadratic recombination of minority charge carries generated in homogeneous direct bandgap semiconductor material by electron beam for the target electrophysical parameters identification was considered.
Keywords: cathodoluminescence semiconductors, scanning electron microscopy, recombination

Baturin A. S., Bulah K. V., Grigal I. P., Egorov K. V., Zablotskiy A. V., Markeev A. M., Lebedinskiy Ju. Ju., Gornev E. S., Orlov O. M., Chuprik A. A. *Resistive Switching Effect in Graded $Hf_xAl_{1-x}O_y$ Films Grown by Atomic Layer Deposition* 13
Thin films of ternary oxide $Hf_xAl_{1-x}O_y$ with graded Al depth profile were deposited by atomic layer deposition for resistive random access memory (ReRAM) cell. Non-destructive parallel angle-resolved depth profiling of $Hf_xAl_{1-x}O_y$ dielectric film was made. Resistive switching effect was study in $TiN/Hf_xAl_{1-x}O_y/Pt$ and $Pt/Hf_xAl_{1-x}O_y/TiN$ metal-dielectric-metal structures.
Keywords: resistive switching effect, atomic layer deposition, non-volatile memory, hafnium oxide

Glukhova O. E., Kossovich E. L. *Explicit Models of Flexural Edge Waves Propagation in Multilayer Graphene Plates* 19
Deflection of a multy-layered graphene plate is studied within a framework of the Continuum theory. Three types of layers stacking (hexagonal elements of the graphene monolayer atomic framework alignment) are considered. These are AAA, ABA and ABC types. Mass densities are found for each of the materials. Also, in the work the explicit models of flexural edge wave propagation in multy-layered graphene plates are modified in order to conform the aforementioned cases. It can be noted that the most firm plates are the plates made of the ABC-stacking type of multy-layered graphene.
Keywords: flexural edge wave, multi-layered graphene, AAA, ABA, ABC-stacking, density, thin elastic plate, Young's modulus, Poisson's ratio, flexural stiffness, Kirchhoff theory of plate bending, Harrison's quantium-chemical method

Averin I. A., Gubich I. A. *Investigation of Recrystaluzation Aluminum Foils — the Stage of Obtaining Porous Aluminum Oxide* 26
The results research of process of recrystallization aluminum foil are presented. The regularities of the education of recrystallized grains with changing temperature and annealing time are identified.
Keywords: recrystallization, porous aluminum oxide, thermal annealing, atomic force microscopy, optical microscopy

Maltsev P. P., Gnatyuk D. L., Fedorov Yu. V., Zuev A. V., Galiev R. R., Poboykina N. V. *Investigation of Small-Signal and Noise Characteristics of Metamorphic HEMTs for Monolithic Integrated Circuits in Millimeter Wave Range* 29
The results of scientific work performed by IUHFSE RAS are reported in the paper. Metamorphic nanoheterostructures for 57—64 GHz power amplifier and low-noise amplifier MMICs are fabricated. Characteristics of manufactured test transistors are studied.
Keywords: monolithic integrated circuit, metamorphic nanoheterostructure, low-noise amplifier, power amplifier

Bobrinetskiy I. I., Bessonova A. V., Komarov I. A., Malovichko A. M., Nazarkin M. Yu., Nevolin V. K., Rimarenko V. S., Tsarik K. A. *Sensitive Properties of Percolating Networks of Carbon Nanotubes and ZnO Nanorods Investigation* 32
In this article authors suggested a method of nanoconductor based sensor structures sensitivity improvement. This is based on the usage of heterogenic composite of carbon nanotubes and semiconducting nanorods. Structure with composite based sensing area was developed. A dependence of sensor resistance and response on ammonia vaporous, composite specific surface on carbon nanotube and ZnO proportion in composite. It was shown that sensitivity decrease ten times when nanotube concentration changes from 60 to 80 %. This result can be used in "electronic nose" systems development.
Keywords: specific surface area, ammonia, gas sensor

Kernbach S. *Exploring a High-Penetrating Capability of LED and Laser Emission. Part 1* 38
This work explores interactions between LED/laser emitters and sensors based on electric double layers (EDL). The goal is to detect a high-penetrating component of the emission. The technology of EDL-based signal detection can find its application in development of microsensors for deep-water emergency communication systems. Experiments are performed in laboratory conditions at distance of 0,25—50 meters between devices with obstacles such as reinforced concrete steel constructions. Field experiments are performed at distance of 1,65 km. In total about 100 independent experiments with 700 measurements are performed. In the first part of this work we describe conditions and methodology of these experiments as well as control measurements at short distances.
Keywords: underwater communication systems, LED/laser emission, sensors based on electric double layers, high-penetrating component of the emission

Prokofiev I. V., Sukhanov V. S. *Complexification of Magnetoinertial and Satellite Navigation Systems for Vehicle Motion Monitoring System* 47
The object of research is methods of producing integrated and complexificated magnetoinertial and satellite navigation systems based on microelectromechanical (MEMS) and nanoelectromechanical (NEMS) systems for solving intellectual vehicle monitoring and management tasks.
Keywords: inertial system, satellite navigation system, microelectromechanical system, data complexification, intellectual navigation system

Abramov I. I. *The Brain is an Object of Organic Hybrid Nanoelectronics, or Another Point of View. Part IV* . . 49
A new interpretation of human brain as an organic hybrid nanoelectronics object created by Nature is presented. The nearest analogue in artificial electronics is an integrated circuit of micro- and nanoelectronics. Therefore the comparison of the neuronal circuits of the brain with integrated circuits was made and their basic differences were determined. The proposed interpretation and its consequences allow, on the one hand, to analyze the principles of the brain functioning more deeply, and, on the other — to suggest a complex approach of brain investigation, based on multilevel simulation combined with experimental methods. In the part IV the answer to the following question is presented: "What's farther?"

Keywords: the brain, nanoelectronics, an electronic interpretation

For foreign subscribers:

Journal of "NANO and MICROSYSTEM TECHNIQUE" (Nano- i mikrosistemnaya tekhnika, ISSN 1813-8586)

The journal bought since november 1999.
Editor-in-Chief Ph. D. Petr P. Maltsev
ISSN 1813-8586.
Address is: 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel./Fax: +7(499) 269-5510.
E-mail: nmst@novtex.ru; http://novtex.ru/nmst/

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромынский пер., 4. Телефон редакции журнала **(499) 269-5510. E-mail: nmst@novtex.ru**
Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства
в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Дизайнер *Т. Н. Погорелова*. Технический редактор *Е. М. Патрушева*. Корректор *Т. В. Пчелкина*

Сдано в набор 19.04.2012. Подписано в печать 22.05.2013. Формат 60×88 1/8. Заказ МС613.
Цена договорная
Оригинал-макет ООО «Адвансед солюшнз».
Отпечатано в ООО «Адвансед солюшнз». 105120, г. Москва, ул. Нижняя Сыромятническая, д. 5/7, стр. 2, офис 2.