

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 7 (120) ✧ 2010

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.
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.
Андривский 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.
Норенков И. П.
Панич А. Е.
Панфилов Ю. В.
Петросьянц К. О.
Петрунин В. Ф.
Путилов А. В.
Пятышев Е. Н.
Сухопаров А. И.
Телец В. А.
Тимошенко С. П.
Тодуа П. А.
Шубарев В. А.

Отв. секретарь

Лысенко А. В.

Редакция:

Григорин-Рябова Е. В.
Чугунова А. В.

Учредитель:
Издательство
"Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Булярский С. В., Басаев А. С., Галперин В. А., Павлов А. А., Пятилова О. В.,
Цыганцов А. В., Шаман Ю. П. Гомогенное и гетерогенное формирование кластеров
катализаторов для роста углеродных нанотрубок 2

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Мустафаев Г. А., Мустафаев Аб. Г., Мустафаев Ар. Г. Влияние конструкции
на характеристики субмикронных КНИ МОП-транзисторов 8

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Мишина Е. Д., Сигов А. С., Казанцева Е. В., Мухортов В. М. Возбуждение колебаний
поляризации при прохождении электрического импульса в тонкой сегнетоэлектрической
пленке 13
Бабаевский П. Г., Жуков А. А., Корпунин А. С., Резниченко Г. М. Деформационно-проч-
ностные свойства модифицированных полиимид-кремниевых
упруго-шарнирных микроструктур 15
Серегин Д. С. Влияние температуры кристаллизации на электрофизические свойства
пленок ЦТС 19
Бокарев В. П., Горнев Е. С. Применение контактной литографии в процессах переноса
субмикронного изображения при изготовлении МЭМС и ПАВ-устройств 23
Афанасьев М. С., Митягин А. Ю., Чучева Г. В., Косарев С. А., Колодяжный И. Ю. Техноло-
гия изготовления аккумуляторов водорода на основе углеродных пленок, легированных
фтором 27
Штенников В. Н. Методика обеспечения требуемой температуры контактной пайки 30

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Войцеховский А. В., Коханенко А. П., Коротаев А. Г., Григорьев Д. В., Кульчицкий Н. А.,
Мельников А. А. Влияние облучения на характеристики приборов с накоплением заряда 32
Драгунов В. П., Остергак Д. И. Электростатические взаимодействия в МЭМС
с плоскопараллельными электродами. Часть I. Расчет емкостей 37
Боронахин А. М., Иванов П. А., Суков И. Л. Коррекция влияния линейного
ускорения на показания микромеханического гироскопа 41
Михайлов В. П., Базиненков А. М., Кузнецов А. С., Зобов И. К., Шаков К. Г. Системы
реологического типа для микро- и нанопозиционирования и виброизоляции 45
Негров Д. В., Лейченко А. С., Шешин Е. П. Элемент дисплейной матрицы
на основе автоэмиссионного катода из терморасширенного графита 50

ИНФОРМАЦИЯ

Contents 55

Аннотации на русском и английском языках с 1999 г. по настоящее время находятся в свободном доступе на сайтах журнала (<http://novtex.ru/nmst>, <http://microsystems.ru>) и научной электронной библиотеки (<http://elibrary.ru>). Электронные версии полнотекстовых статей расположены на сайте журнала: с 1999 г. по 2003 г. в разделе "ПОИСК СТАТЕЙ", а с 2004 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:
e-mail: nmst@novtex.ru

УДК 538.95; 539.21

С. В. Булярский¹, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф.,
А. С. Басаев², канд. физ.-мат. наук, зам. дир-ра,
В. А. Галперин², канд. техн. наук, нач. лаб.,
А. А. Павлов², мл. науч. сотр.,
О. В. Пятилова¹, магистрант,
А. В. Цыганцов¹, аспирант,
Ю. П. Шаман², мл. науч. сотр.,
¹ ГОУ ВПО Ульяновский государственный университет, Ульяновск,
e-mail: bsv@ulsu.ru
² ГНЦ РФ НПК Технологический центр, Москва,
e-mail: alexander.a.pavlov@gmail.com

ГОМОГЕННОЕ И ГЕТЕРОГЕННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ КЛАСТЕРОВ КАТАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ РОСТА УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Исследована термодинамика гомогенного и гетерогенного образования кластеров катализаторов для процесса CVD с "летучим" катализатором. Экспериментально и теоретически исследованы параметры образования кластеров, возникающих в результате пиролиза ферроцена. Показано, что поверхностное натяжение и размеры кластеров существенно зависят от температуры. Вычислены коэффициенты поверхностного натяжения, а также характерные размеры кластеров. Полученные зависимости и параметры позволяют восстанавливать функцию распределения кластеров по размерам, задавая температуры в рабочей зоне и в области сублимации ферроцена. Это дает возможность прогнозировать размеры кластеров, в зависимости от параметров синтеза, в частности температуры.

Ключевые слова: формирование кластеров, катализатор, УНТ

Углеродные нанотрубки (УНТ) имеют уникальные параметры [1]. Они были обнаружены в 1991 г. [2] и привлекают исследователей разнообразием электрических, оптических, эмиссионных, химических и механических свойств. Исследования последних лет показали, что рост углеродных нанотрубок можно успешно совмещать с процессами кремниевой планарной технологии [3, 4]. Это открывает перспективы создания многофункциональных наноструктурированных материалов с новыми уникальными свойствами. Для успешной реализации данной задачи необходимо, чтобы рост УНТ был управляемым с предсказуемыми параметрами. В свою оче-

редь, известно, что рост УНТ во многом зависит от условий формирования кластеров катализаторов, материал и размеры которых определяют качество и характеристики будущих углеродных нанотрубок [5, 6]. Рост углеродных нанотрубок осуществляется, как правило, методом химического разложения углеводородов в присутствии катализатора (CVD) [1, 7]. Этот метод имеет преимущество по сравнению с высокотемпературными методами благодаря своей управляемости и относительно низкой температуры синтеза, что важно для получения УНТ на кремниевых структурах.

Цель данной работы — построение теоретической модели гомогенной и гетерогенной нуклеации и выявление влияния поверхностного натяжения на формирование кластеров для процесса CVD с "летучим" катализатором. Для решения этой задачи исследуется термодинамика нуклеации и выполняются эксперименты по росту кластеров железа, образующихся в процессе пиролиза ферроцена при различной температуре как в газовой среде реактора, так и на подложках кремния и диоксида кремния. На основании теоретических и экспериментальных данных разработан алгоритм определения температурной зависимости поверхностного натяжения наноразмерных кластеров и влияния этого параметра на распределение кластеров по размеру.

Парциальная свободная энергия кластера

Кластер — система связанных атомов и молекул. Свободная энергия кластера зависит от числа частиц в нем, энергии связи между частицами, а также поверхностной энергии, энергии образования дефектов и внедрения примесей.

Рассмотрим последовательно указанные составляющие энергии при гомогенном зарождении кластера. Энергия связи между частицами g_{μ} состоит из суммы энергий присоединения отдельных атомов к кластеру. Данная энергия равна химическому потенциалу атомов в кластере. Кроме того, она связана с энтальпией десорбции (испарения атома) с поверхности твердого тела [8] следующим образом:

$$g_{\mu} = -\Delta H n_i, \quad (1)$$

где n_i — число атомов в кластере; ΔH — значение энергии сублимации атомов из расплава элемента, образующего кластер. Знак минус указывает на притяжение между атомами кластера.

Свободная энергия поверхности вносит значительный вклад в общую энергию кластера. Значение этой энергии определяется не только природой атомов кластера, но и формой кластера [9, 10]. Это связано с неэквивалентным положением атомов класте-

ра на различных кристаллографических плоскостях. Если учесть, что квадрат радиуса кластера пропорционален числу частиц в кластере в степени две третьих, для кластеров, образующих гранецентрированную, объемно-центрированную, гексагональную кристаллические решетки, было получено следующее выражение для парциальной свободной энергии кластера [9]:

$$g_i = g_{\mu} + g_s = -\Delta H n_i + B \Delta H n_i^{\frac{2}{3}}, \quad (2)$$

где g_s — поверхностная энергия; B — константа, равная $\sim 1,35$ [9].

Альтернативный подход связан с введением коэффициента поверхностного натяжения γ , при этом $g_s = S \gamma$ [11], где S — площадь поверхности кластера. Тогда для сферического кластера с учетом (1) получаем следующее выражение для свободной энергии:

$$g_i = -\Delta H n_i + 4\pi r_i^2 \gamma_i, \quad (3)$$

где r_i — радиус кластера; γ_i — коэффициент поверхностного натяжения металла, образующего кластер. Знак минус указывает только на притяжение между атомами в кластере.

Второе слагаемое в формуле (3) связано с ограничениями геометрических размеров кластера и возникновением границы, отделяющей кластер от окружающей среды. Квазимолекулы и атомы на границе имеют оборванные связи, в силу чего возникает поверхностная (граничная) энергия, дополнительная к свободной энергии объема кластера. Заметим, что при формировании кластера на поверхности подложки коэффициент поверхностного натяжения системы кластер катализатора — подложка может менять свой знак, что существенно скажется на размерах кластера. В данной работе изучается формирование кластеров только в газовой фазе. Недостатком формулы (3) является то, что она не учитывает реальную форму кластера. Однако в большинстве случаев она неизвестна, а исследование этого вопроса продолжается как теоретически, так и экспериментально.

Обе формулы (2) и (3) удобно использовать для расчета параметров кластера. Отметим еще одну особенность, относящуюся к поверхностной энергии кластера. Ясно, что реальный кластер, имеющий одну из рассматриваемых структур, может содержать небольшое число вакансий или примесных молекул. Это отразится на параметрах индивидуальных молекул, находящихся внутри кластеров, а также на таких параметрах, как потенциал ионизации, энергия сродства, резонансная энергия фотонов и т. д. Однако до определенных параметров легирования, а именно пока кластер можно считать состоящим из частиц одного сорта, а не раствором атомов и молекул нескольких сортов, можно не учитывать наличие дефектов в кластере. В то же время, если рассматривать процесс легирования кластера, то свободной энергией дефектов пренебрегать нельзя. Подробнее данный вопрос рассмотрен в работе [12].

При гетерогенном зарождении кластера существенную роль играет подложка. На рис. 1 приведен

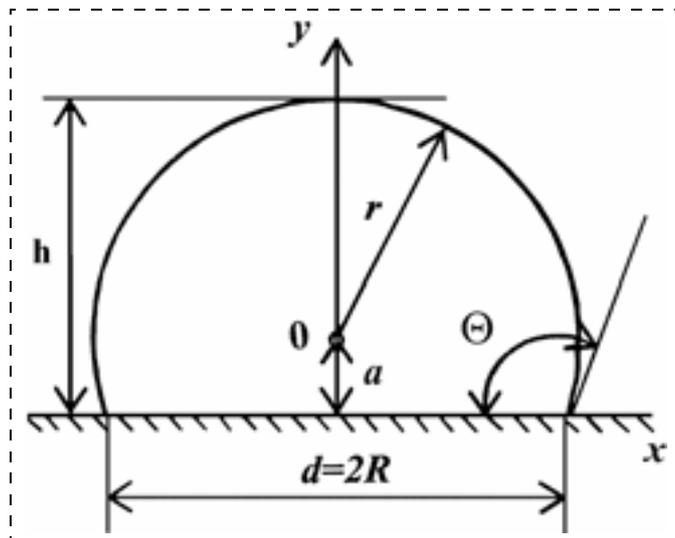


Рис. 1. Схема кластера на поверхности подложки

кластер на подложке и показаны его характерные параметры. Поверхностная энергия такого кластера

$$g_s = 2\pi r h \gamma_l + \pi R^2 \gamma_{sl}, \quad (4)$$

где r — радиус внешней поверхности кластера; h — высота кластера; R — радиус части кластера, соприкасающегося с подложкой; γ_l — коэффициент поверхностного натяжения жидкого металла, образующего кластер; γ_{sl} — коэффициент поверхностного натяжения на границе кластера с подложкой.

Воспользовавшись формулой для косинуса угла смачивания $\cos \Theta = (\gamma_s - \gamma_{sl})/\gamma_l$, а также известными тригонометрическими выражениями, получим

$$g_s = \pi r^2 [2\gamma_l (1 + \cos \Theta) + \gamma_{sl} (1 - \cos^2 \Theta)] = \pi r^2 \gamma_{ef}. \quad (5)$$

Таким образом, при гетерогенном зарождении энергии кластера (3) можно представить аналогичной формулой, но вместо коэффициента поверхностного натяжения чистого материала появляется эффективный коэффициент зарождения γ_{ef} , который является комбинацией коэффициентов поверхностного натяжения материала кластера, подложки и границы раздела подложка—кластер.

Расчет функции распределения кластеров по числу частиц (размеру) в общем виде

Расчет параметров проведем методом минимизации свободной энергии Гиббса [12—15]. Будем считать, что кластеризация происходит в газовой фазе. Для расчета конфигурационной энтропии важно ввести понятие числа мест для молекул в газовой фазе. Число мест равно предельному числу молекул данного сорта, которые могут одновременно находиться в газовой фазе при данных условиях. В соответствии с этим определением число мест можно рассчитать исходя из давления насыщенного пара, состоящего целиком и полностью из газа атомов металла рассматриваемого сорта.

Независимо от того, в каком агрегатном состоянии находятся молекулы, можно выделить число

мест (N^{Fe}) и число частиц (N_{Fe}). В конденсированной жидкой среде все места заполнены частицами, поэтому эти два числа равны. В среде идеального газа эти числа можно выразить через давления:

$$N^{\text{Fe}} = p_s^{\text{Fe}} V^{\text{Fe}}/kT; N_{\text{Fe}} = p^{\text{Fe}} V^{\text{Fe}}/kT, \quad (6)$$

где p^{Fe} — парциальное давление; p_s^{Fe} — парциальное давление насыщенного пара; V^{Fe} — объем, занимаемый атомами железа.

Для дальнейших рассуждений важно понять следующее. Число атомов железа в газовой фазе существенно меньше, чем число мест, так как давление пара железа существенно ниже давления насыщения. Кластеры образуются не потому, что в потоке газа имеется насыщенный пар атомов железа, а в результате взаимодействия между атомами, которые приводят к появлению кластеров. Кластер состоит из атомов железа и размещается по свободным местам как целое, хотя и состоящее из определенного числа частиц.

Важную роль играют законы сохранения числа мест. В данном случае происходит кластеризация одного сорта атомов, поэтому закон сохранения числа мест описывается одним уравнением:

$$\varphi^{\text{Fe}} = N^{\text{Fe}} - N_{\text{Fe}} - N_{\text{Fe}}^0 = 0, \quad (7)$$

где N_{Fe}^0 — число мест в газовой фазе, которые остаются свободными.

Закон сохранения числа мест в случае кластера также имеет свои особенности. Мы введем следующие параметры кластера: N_i — число кластеров, содержащих одинаковое число частиц железа — n_i . Произведение $N_i n_i$ дает общее число частиц в кластерах, содержащих число частиц железа — n_i . По индексу i мы будем проводить суммирование. Общее число атомов железа в системе остается постоянным, так как в ней установилось стационарное состояние. Законы сохранения числа атомов описываются следующим уравнением:

$$\varphi_{\text{Fe}} = N_{\text{Fe}} - \sum_i N_i n_i = 0. \quad (8)$$

Термодинамическая вероятность определяется размещением атомов железа по местам, при этом атомы образуют центры, по которым размещаются кластеры, содержащие $N_i n_i$ атомов. Так как перестановки атомов внутри кластеров не изменяют их, то необходимо это учитывать. Окончательно для термодинамической вероятности получаем

$$W = \frac{N_{\text{Fe}}! \prod_i (R_i)^{N_i}}{(N^{\text{Fe}} - N_{\text{Fe}} - N_{\text{Fe}}^0)! \prod_i (N_i n_i)! (n_i!)^{N_i}}, \quad (9)$$

где R_i — кратность вырождения кластера. В кристаллическом теле эта величина связана с понижением симметрии решетки при образовании кластера, симметричного дефекта или комплекса. В газовой фазе понятие решетки неприменимо, соответственно, вырождение отсутствует ($R_i = 1$).

Свободную энергию кристалла запишем в виде:

$$G = \sum_i N_i g_i - kT \ln W. \quad (10)$$

Используя формулы (6)–(10), запишем функционал, который будем минимизировать:

$$\begin{aligned} \Phi = & \sum_i N_i g_i - kT [-N^{\text{Fe}} + N^{\text{Fe}} \ln N^{\text{Fe}} + \\ & + \sum_i N_i \ln R_i - (N^{\text{Fe}} - N_{\text{Fe}} - N_{\text{Fe}}^0) \ln(N^{\text{Fe}} - \\ & - N_{\text{Fe}} - N_{\text{Fe}}^0)] - kT [N^{\text{Fe}} - N_{\text{Fe}} - N_{\text{Fe}}^0 + \\ & + \sum_i N_i n_i - \sum_i N_i n_i \ln(N_i n_i) + \sum_i N_i n_i - \sum_i N_i n_i \ln(n_i)] + \\ & + \lambda^{\text{Fe}} (N^{\text{Fe}} - N_{\text{Fe}} - N_{\text{Fe}}^0) + \lambda_{\text{Fe}} (N_{\text{Fe}} - \sum_i N_i n_i), \quad (11) \end{aligned}$$

где λ^{Fe} , λ_{Fe} — свободные множители Лагранжа.

Проводим операцию минимизации, для чего вычисляем производные:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial N_i} = & g_i - kT [\ln R_i - \ln(N_i n_i)]^{n_i} + \\ & + n_i - \ln(n_i)^{n_i} - \lambda_{\text{Fe}} n_i = 0, \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial N^{\text{Fe}}} = & -kT [\ln(N^{\text{Fe}}) - \\ & - \ln(N^{\text{Fe}} - N_{\text{Fe}} - N_{\text{Fe}}^0)] + \lambda^{\text{Fe}} = 0, \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial N_{\text{Fe}}} = & -kT [\ln(N^{\text{Fe}} - N_{\text{Fe}} - N_{\text{Fe}}^0) - \ln n] + \\ & + \lambda_{\text{Fe}} - \lambda^{\text{Fe}} = \mu_{\text{Fe}}, \quad (14) \end{aligned}$$

$$\mu_{\text{Fe}} = \mu_{\text{Fe}}^0 + kT \ln(a_{\text{Fe}}). \quad (15)$$

Определив из уравнений (13) и (14) неопределенные множители Лагранжа, из уравнения (12) с учетом (3) либо (5) и (15) получим формулу для числа кластеров, имеющих n_i атомов:

$$N_i = a_{\text{Fe}}(R_i)^{n_i} \frac{N_{\text{Fe}}}{n_i^{n_i}} \exp \left[\frac{\Delta H \left(1 - 1,25 n_i^{-\frac{1}{3}} \right)}{kT} \right]. \quad (16)$$

Проанализируем, какие параметры системы определяют характеристики распределения (16). Форма распределения, а именно максимум и полуширина, определяется только коэффициентом 1,25, введенным в работе [9]. Как будет показано ниже, это недостаток модели, принятой в данной работе. Число кластеров определяется энергией сублимации атомов, температурой и концентрацией ферроцена в газовой фазе. Заметим, что температура определяет концентрацию кластеров как непосредственно, входя в показатель экспоненты формулы (16), так и опосредованно через число мест N^{Fe} , которые могут занимать атомы железа, определяемые формулой (6). Концентрация ферроцена входит в величину активности. Можно управлять процессом роста кластеров, изменяя указанные выше параметры.

Вычислим по формуле (16) концентрацию кластеров при единичной активности железа и температуре 950 °С. Расчет показывает, что максимум распределения кластеров по числу частиц достигается при $n_i = 700$. Железо в кластерах имеет гранецентрированную элементарную ячейку [16]. Поэтому она имеет объем a^3 и в этом объеме находятся четыре атома. Соответственно, объем кластера $a^3 n_i / 4$, а его радиус можно вычислить по формуле

$$r_i = \left[\frac{3}{16} \frac{a^3 n_i}{\pi} \right]^{\frac{1}{3}}. \quad (17)$$

Вычисления по формуле (16) для атомов железа, формирующих кластеры катализатора в пространстве, показывают, что для кластера с оптимальным числом атомов радиус капли составляет порядка 1 нм. Однако, так как распределение с увеличением числа частиц изменяется медленно, то имеются и более крупные капли. Например, кластер, содержащий 10 000 атомов, будет иметь радиус до 3 нм.

Получим распределение кластеров с учетом поверхностного натяжения. Для этого используем для свободной энергии кластера формулу (5). Получаем следующую формулу для распределения кластеров по размерам:

$$N_i = a_{\text{Fe}}(R_i)^{n_i} \frac{N_{\text{Fe}}}{n_i^2} \exp \left[\frac{\Delta H - 4\pi a^2 \gamma_{ef}(n_i)^{-\frac{1}{3}} \left(\frac{3}{8\pi} \right)^{\frac{3}{2}}}{kT} \right]. \quad (18)$$

Подставим формулу (17) в (18) и получим распределение кластеров по размерам в явном виде:

$$N_i = \frac{A}{r_i^6} \exp \left(-\frac{b}{r_i} \right), \quad (19)$$

где $A = \frac{9 a_{\text{Fe}}(R_i)^{n_i} N_{\text{Fe}} a^6}{64\pi^2} \exp \left(\frac{\Delta H}{kT} \right)$, $b = \frac{3 a^3 \gamma_{ef}}{2kT}$.

Распределение достигает максимума, когда радиус кластера принимает значение $r_{i\text{max}} = b/6$.

Отличим распределений (18) и (19) от формулы (16) является зависимость положения максимума распределения от значения поверхностного натяжения. В свою очередь, поверхностное натяжение учитывает природу вещества, из которого образован кластер. В связи с этим распределения (18) и (19) — точнее, а модель, принятая в данной работе и учитывающая, что свободная энергия кластера зависит от значения поверхностного натяжения, является более точной по сравнению с описанной в работе [9].

Экспериментальное определение коэффициента поверхностного натяжения при гомогенном формировании кластеров

Формирование металлических кластеров осуществлялось в потоке аргона в реакторе CVD, где проводился каталитический пиролиз ксилола с использова-

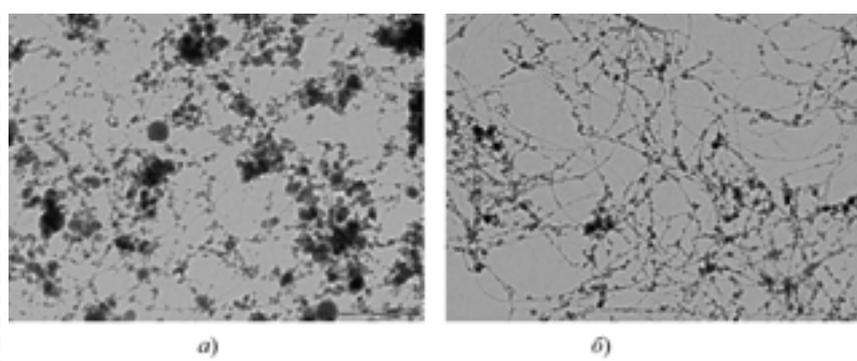


Рис. 2. Электронно-микроскопический контраст кластеров железа, полученных при температуре 950 °С (а) и 1050 °С (б)

нием в качестве "летучего" катализатора ферроцена. Синтез кластеров происходил при различной температуре: 850, 950 и 1050 °С, при заданной концентрации источника железа в углеводородной смеси ферроцена с ксилолом (ферроцен, 1...10 вес. % смеси) и скорости газа-носителя (Ar, 50...200 см³/мин).

Необходимо учесть, что за пределы реактора, температура в котором достаточно высока, выносятся кластеры, находящиеся в пространстве реактора, а не на подложке. Те же кластеры, которые находятся на подложке, скреплены с ней и на подложке остаются. Постоянная распада ферроцена (источник кластеров железа) определяется формулой $K = 2,14 \cdot 10^9 \exp(-1,77/kT)$, с⁻¹ [17]. При мономолекулярной реакции разложения равновесие в реакторе при 950 °С устанавливается за 0,006 с. При этом в газовой фазе существуют кластеры определенного размера, в соответствии с равновесным термодинамическим распределением (18). Никаких иных, кроме равновесных, процессов не происходит, в том числе нет коалесценции и спекания, так как эти процессы кинетические и в равновесных условиях не протекают.

По специальной методике сформировавшиеся кластеры поток аргона выносил из рабочей зоны реактора. Кластеры за пределами реактора осаждались на медную сетку, температура которой составляла не более 250 °С. Градиент температуры был достаточно резкий, кластер менее чем за секунду выходил из высокотемпературной рабочей зоны, поэтому можно предположить, что процессы диффузии и спекания кластеров были "заморожены", что препятствовало процессам коалесценции кластеров. Они фиксировались быстрым понижением температуры. Поэтому размеры кластеров, образовавшихся в рабочей зоне, не изменялись. Кроме того, кластеры не свободны, часть из них, как это видно на рис. 2, соединены углеродными нанотрубками, которые образуют подобие сети и делают кластеры изолированными и малоподвижными. Это дает основания предположить, что распределение кластеров по размерам сохраняется.

Конечно процесс формирования кластеров динамический, они сталкиваются в реакторе, меняют свои размеры и т. д. В то же время, этот процесс статистический, а значит в целом равновесие обусловлено термодинамическим равновесием, которое устанавливается в результате многократных взаимодействий частиц. Поэтому сопоставление расчетной формулы с экспе-

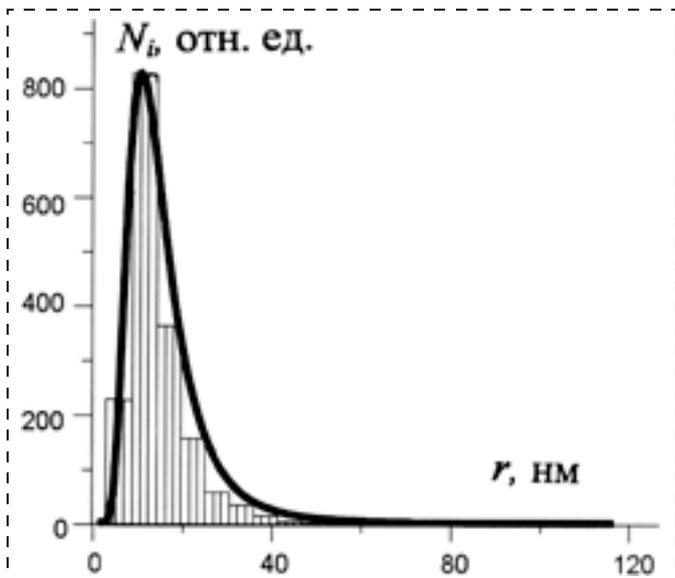


Рис. 3. Распределение кластеров катализатора по размерам. Гистограмма — экспериментальное распределение, сплошная кривая — расчет по формуле (18)

риментом правомерно. Совпадение формы экспериментального и теоретического распределений, а также порядка коэффициента поверхностного натяжения, говорит о том, что модель достаточно точна.

Параметры полученных образцов определяли на просвечивающем электронном микроскопе марки Philips CM30. Контраст образцов приведен на рис. 2. Видно, что диаметры кластеров изменяются в достаточно широком диапазоне: от 0,5 до 8,0 нм. Этот диапазон был разбит на интервалы по 0,5 нм, после чего подсчитывалось число кластеров на единицу площади, приходящихся на заданный интервал размеров. По результатам подсчета была построена гистограмма, которая приведена на рис. 3.

В целях повышения точности определения коэффициента поверхностного натяжения был разработан метод моментов. В этом методе рассчитывают моменты распределения, которые являются интегральными показателями, вычисляемыми по формулам

$$M_n = \int_0^{\infty} r^n \frac{1}{r^6} e^{-\frac{b}{r}} dr, \quad (20)$$

где M_n — момент распределения порядка n ; r — радиус кластера,

$$b = \frac{3a^3\gamma_{ef}}{4kT}.$$

Первый момент имеет смысл площади распределения. Нормируя на него, мы тем самым устраняем ряд ошибок эксперимента. Кроме того, процесс интегрирования во многом уменьшает случайные ошибки вычислений. Приведем первые нормированные моменты теоретического распределения (19): $M_1/M_0 = \frac{1}{4} b$;

$$M_2/M_0 = \frac{1}{12} b^2; \quad M_3/M_0 = \frac{1}{24} b^3.$$

Для определения коэффициента поверхностного натяжения вычисляли первые нормированные моменты экспериментального распределения кластеров по размерам, определяли параметр b , а затем по формуле (20) — коэффициент поверхностного натяжения. На рис. 3 приведен вид функции распределения кластеров по размерам (19), она достигает максимума при определенном радиусе r_{\max} , который также зависит от температуры. Находя экстремум функции распределения (19), легко получить, что $r_{\max} = 6b$.

Таким образом, поверхностная энергия существенным образом зависит от температуры и от размеров кластера. При равновесном формировании кластеров одновременно работают оба фактора. Поэтому важно вычислить экспериментальные величины, описывающие функцию распределения.

В работах [18—20] получены зависимости поверхностного натяжения от радиуса кластера. В классической работе Толмена приведено следующее выражение для этого параметра [18]:

$$\gamma = \gamma_0 \left(1 + \frac{2\delta}{r} \right), \quad (21)$$

где γ_0 — коэффициент поверхностного натяжения массивного образца; δ — постоянная Толмена, равная толщине поверхностного слоя, который по порядку величины составляет шесть периодов решетки [18]; r — радиус кластера.

В работе [20] получено более точное выражение, которое, по мнению авторов, обеспечивает точность около 5 %:

$$\gamma = \gamma_0 \exp\left(-\frac{4\delta}{\delta + 2r}\right). \quad (22)$$

Определим температурную зависимость поверхностного натяжения массивного образца (γ_0), воспользовавшись выражением (22). Результаты вычислений при трех значениях температуры приведены на рис. 4, а. Температурная зависимость радиуса, соответствующего максимуму распределения, приведена на рис. 4, б. Эти зависимости близки к линейным. Аппроксимируя их соответствующими функ-

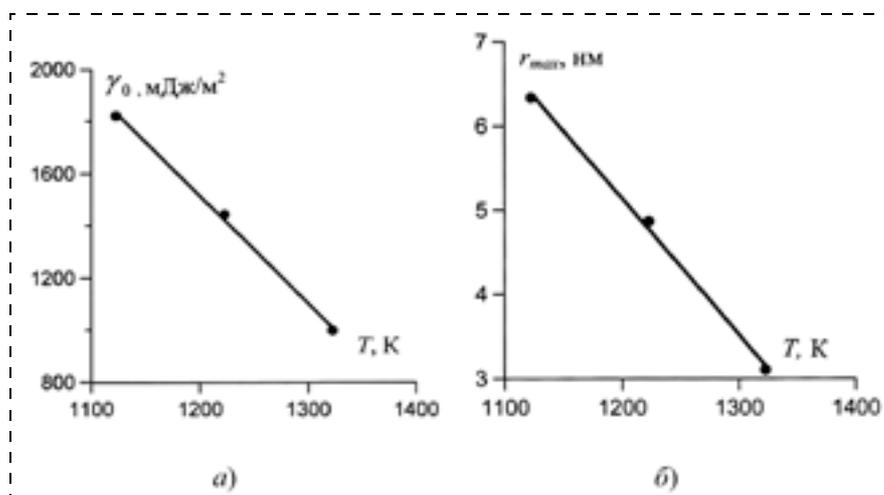


Рис. 4. Температурные зависимости коэффициента поверхностного натяжения (а) и радиуса кластера, соответствующего центру распределения (б)

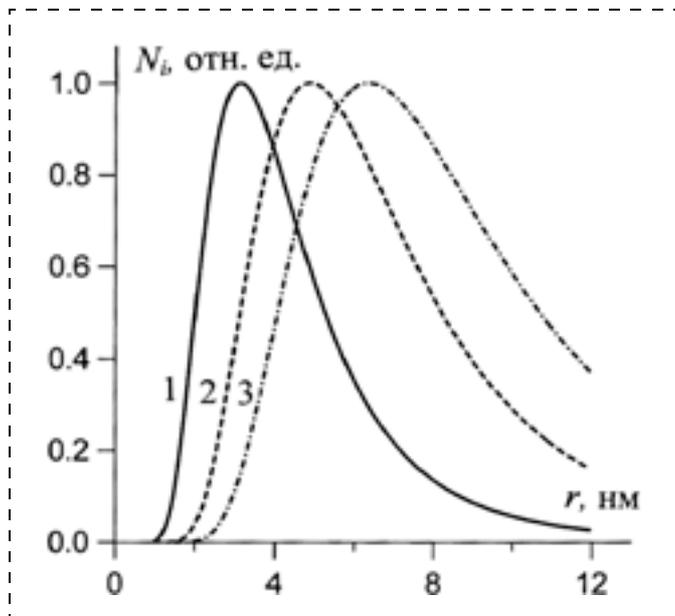


Рис. 5. Распределения кластеров катализатора УНТ по размерам, вычисленные по формуле (18) при трех значениях температуры, °С: 1 — 1050; 2 — 950; 3 — 850

Параметры образования кластеров железа при гетерогенном зарождении на подложках кремния и диоксида кремния

T, К	Подложка кремния			Подложка диоксида кремния		
	r, нм	γ_{ef} , мДж/м ²	γ_{sb} , мДж/м ²	r, нм	γ_{ef} , мДж/м ²	γ_{sb} , мДж/м ²
1023	14	3300	500	—	—	—
1073	—	—	—	11	2930	730
1123	11	3000	470	10	2700	553
1173	8	2200	380	15	4400	-900
1223	10	4700	-900	16	4680	-970

циями, получаем характеристические коэффициенты температурной зависимости, позволяющие выразить эти параметры как функции от температуры:

$$\gamma_0 = -4,10T + 6440, \quad r_{\max} = -0,016T + 24. \quad (23)$$

Таким образом, задав температуру образования кластеров, с помощью формул (23) вычисляем коэффициент поверхностного натяжения, а по формуле (18) восстанавливаем само распределение (рис. 5).

Поверхностное натяжение при гетерогенном формировании кластеров

В качестве подложек использовали две технически важные поверхности: пластины чистого кремния и поверхность кремния, покрытая диоксидом кремния. Эксперимент проводился в реакторе, который описан выше, при тех же технологических условиях. Для того чтобы закрепить сложившееся на подложке термодинамическое равновесие, по окончании стадии формирования кластеров поток аргона резко увеличивался и подложку вместе со сформированными кластерами выдувало из зоны реакции в

холодную часть реактора. При этом сложившееся равновесие замораживалось. Образцы исследовали описанными выше методами. Результаты вычисления эффективного коэффициента поверхностного натяжения приведены в таблице. Следует отметить следующее. При температуре 800 °С наблюдался быстрый рост УНТ на подложках кремния, который подавлялся при более высоких температурах. Это связано со сложными физико-химическими процессами в капле катализатора. Температуры эксперимента достаточно высоки для того, чтобы железо диффундировало из капли в подложку кремния, а также, наоборот, — кремний насыщал кластер катализатора. На границе формируется твердый раствор кремния в железе, а также образуются соединения FeSi₂ и Fe₂SiO₄. Эти соединения убивают активность катализатора. Этим может быть обусловлен факт, что при высокой температуре УНТ на кремнии растут не столь активно. Таким образом, на границе раздела кластера с катализатором происходят сложные, плохо исследованные процессы, которые значительным образом изменяют поверхностное натяжение. Заметим также, что поверхностное натяжение твердых тел вообще с трудом поддается изучению и коэффициенты поверхностного натяжения известны недостаточно хорошо. Температурная зависимость коэффициента поверхностного натяжения железа в кластерах нам известна, сведения о коэффициентах поверхностного натяжения кремния и двуоксида кремния в литературе есть, формула (5) позволяет вычислить по этим данным коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела подложка — кластер. Результаты вычислений также приведены в таблице. С ростом температуры значение поверхностного натяжения на границе меняет знак. Это показывает, что при более низких температурах подложка смачивается расплавом, а с ее повышением подложка уже не смачивается.

* * *

В заключение отметим, что в работе развита термодинамика гомогенного и гетерогенного образования кластеров катализаторов. Экспериментально и теоретически исследованы параметры кластеров катализаторов, образующихся в результате пиролиза ферроцена. В работе показано, что поверхностное натяжение и размеры кластеров существенно зависят от температуры. Также вычислены коэффициенты, определяющие эту зависимость, при этом была учтена концентрация атомов железа в газовой фазе через температуру области, в которой сублимируется ферроцен. Полученные зависимости и параметры позволяют восстанавливать функцию распределения кластеров по размерам, задавая температуры в рабочей зоне и в области сублимации ферроцена. Это дает возможность прогнозировать размеры кластеров, в зависимости от параметров синтеза, в частности температуры. Таким образом, разработанная модель позволяет рассчитать параметры кластеров катализатора, которые в дальнейшем определяют распределение углеродных нанотрубок по диаметру.

Список литературы

1. **Loiseau A., Launous P., Petit P.** Understanding Carbon nanotubes. Springer, 2006. 356 p.
2. **Ijima S.** Helical microtubules of graphite carbon // Nature. 1991. N 354. P. 56—58.
3. **Ahlskor M., Hakonen P., Paalnen M. et al.** Multiwalled Carbon Nanotubes as building blocks in Nanoelectronic // Journal of Low Temperature Physics. 2001. Vol. 124. P. 2—13.
4. **Pulickel M. Ajayan, Otto Z. Zhou:** Applications of Carbon Nanotubes // Carbon Nanotubes, Topics Appl. Phys. 80, 391—425, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2001.
5. **Vesselenyi, Neiesz K., Siska A., Konya Z.** Production of Carbon Nanotubes on different metalsuported catalysts // React. Kinet. Catal. Lett. 2001. V. 74, N 2. P. 329—336.
6. **Кузнецов В. Л., Усольцева А. Н., Мазов И. Н.** Общие закономерности формирования углеродных структур и нитевидных кристаллов карбида кремния на поверхности металлических катализаторов // Российский химический журнал. 2004. № 48. С. 37—45.
7. **Кукушкин С. А., Осипов А. В.** Процессы конденсации тонких пленок // УФН. 1998. Т. 168, № 10. С. 1083—1114.
8. **Samsonov V. M., Malkov O. A.** Thermodynamic model of crystallization and melting of small particales // Central European J. of Physics. 2004. N 2(1). P. 90—97.
9. **Смирнов Б. М.** Кластеры с плотной упаковкой // УФН. 1997. Т. 167, № 10. С. 1169—1185.
10. **Магомедов М. Н.** О зависимости поверхностной энергии от размера и формы нанокристаллов // ФТТ. 2004. Т. 46, № 5. С. 924—931.
11. **Булярский С. В., Басаев А. С., Галперин В. А., Павлов А. А., Пятилова О. В., Цыганцов А. В., Шаман Ю. П.** Термодинамика формирования кластеров катализаторов для роста углеродных нанотрубок // Известия ВУЗов. Электроника. 2010. № 1 (81). С. 50—56.
12. **Булярский С. В., Светухин В. В.** Физические основы управления дефектообразованием в полупроводниках. Ульяновск: Изд. Ульяновского университета, 2003. 385 с.
13. **Bulyarsky S. V., Oleinikov V. P.** Thermodynamically Evaluation of Point Defect Density and Impurity Solubility in Compounds Semiconductors // Phys. Stat. Sol. (b). 1987. N 141, K7-K10.
14. **Bulyarsky S. V., Oleinikov V. P.** Thermodynamics of Defect formation and Defect Interaction in Compound Semiconductors // Phys. Stat. Sol. (b). 1988. N 146. P. 439—446.
15. **Булярский С. В., Фистуль В. И.** Термодинамика и кинетика взаимодействующих дефектов в полупроводниках. М.: Наука. Физматлит, 1997. 351 с.
16. **Корнеева Ю. В.** Структурные превращения в металлических частицах катализаторов в различных процессах синтеза углеродных нанотрубок / Автореферат дис. на соискание уч. степени канд. физ.-мат. наук по специальности 01.04.07 — физика конденсированного состояния. Москва, 2008, 21 с.
17. **Александров Ю. А., Дягилева Л. М., Цыганова Е. И.** Термодинамическое разложение органических производных переходных металлов. М.: Наука, 1993. 203 с.
18. **Tolman R. C.** The defect of droplet size on surface tension // J. Chem. Phys. 1949. V.17, N 2. P. 333—338.
19. **Nanda K. K.** Size-dependent melting of nanoparticles: hundred yeas of thermodynamic model // Pramana J. Phys. 2009. V. 72, N 4. P. 617—623.
20. **Рехвиашвили С. Ш., Кишტიкова Е. В.** О температуре плавления наночастиц и наноструктурных веществ // Письма ЖТФ. 2006. Т. 32, № 10. С. 50—55.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

УДК 621.382.3

Г. А. Мустафаев¹, д-р техн. наук, проф., зав. каф.,

Аб. Г. Мустафаев¹, канд. техн. наук, препод.,

Ар. Г. Мустафаев², канд. техн. наук, ст. препод.,

¹ Кабардино-Балкарский государственный университет

² Дагестанский государственный технический университет,

e-mail: arslan_mustafaev@mail.ru

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СУБМИКРОННЫХ КНИ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ

Проведено моделирование КНИ МОП-транзисторов с различной конструкцией затворной композиции. Исследована зависимость подпороговых характеристик КНИ МОП-транзисторов от геометрических размеров базовой области, длины и ширины канала, толщины подзатворного оксида и уровня легирования канала.

Ключевые слова: кремний на изоляторе, моделирование, МОП-транзистор

Введение

Приборно-технологическое моделирование является одним из ключевых элементов систем автоматизированного проектирования БИС и СБИС. В настоящее время прогресс в области микро- и наноэлектроники сопровождается усилением роли приборно-технологического моделирования. Применение экспериментальных методов при исследовании полупроводниковых структур с нанометровыми размерами не дает высокой точности результатов, необходимой для надежного прогнозирования приборных характеристик. Нельзя также обойтись только экспериментальными исследованиями при поиске и оптимизации принципиально новых приборных структур и конструктивных решений. Разумной альтернативой в этих случаях является использование численного моделирования [1].

Основными проблемами микроминиатюризации МОП-транзисторов являются:

- туннелирование через затвор;
- инжекция горячих носителей в оксид;
- прокол между истоком и стоком;
- утечки в подпороговой области;

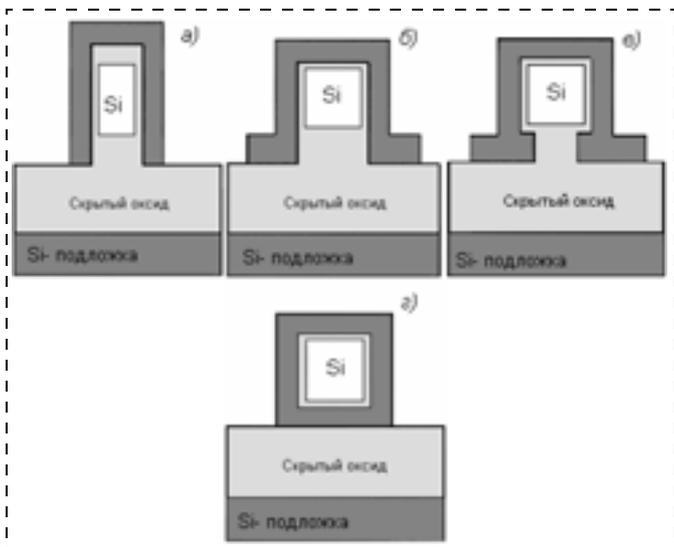


Рис. 1. Конструкция КНИ МОП-транзисторов в направлении, перпендикулярном течению тока:

а — FinFET; б — П-затвор; в — Ω-затвор; г — кольцевой затвор

- уменьшение подвижности носителей в канале;
- увеличение последовательного сопротивления между истоком и стоком;
- обеспечение запаса между пороговым напряжением и напряжением питания [2, 3].

Транзистор должен иметь слабую зависимость порогового напряжения от напряжения на стоке, от длины и ширины канала, а также большое выходное сопротивление, малое сопротивление областей истока и стока, высокую крутизну передаточной характеристики и высокую нагрузочную способность. Для увеличения степени интеграции, быстродействия и снижения влияния короткоканальных эффектов на смену классическим планарным МОП-транзисторам с одним затвором были предложены трехмерные МОП-транзисторы с двумя, тремя или даже четырьмя затворами [4–9], изготовленные по технологии кремний-на-изоляторе (КНИ).

В работе проведено исследование подпороговых характеристик КНИ МОП-транзисторов различных конструкций (рис. 1), а также влияния масштабирования на характеристики приборов. Численное моделирование осуществлялось с помощью программ SSuprem-4 и S-Pisces [10, 11].

Эксперимент и обсуждение

Для сравнения характеристик транзисторов была выбрана ширина канала, равная 150 нм, и геометрия базы КНИ МОП-транзистора была скорректирована для всех приборов. Основные параметры транзисторов сведены в таблице.

Были исследованы выходные характеристики $I_c = f(U_c)$ при $U_3 = \text{const}$ КНИ МОП-транзисторов (рис. 2). Все

исследуемые структуры показывают относительно высокое значение тока стока I_c в сравнении с планарными МОП-транзисторами.

Быстродействие структур может быть оценено исследованием крутизны передаточной характеристики $g_m = \frac{dI_c}{dU_3}$. С увеличением смещения U_3 на за-

творе крутизна характеристики увеличивается для всех транзисторов, далее входит в насыщение, а затем падает в зависимости от напряженности поперечного электрического поля в канале (рис. 3). КНИ МОП-транзистор с П-затвором показывает лучшее значение передаточной характеристики.

МОП-транзисторы масштабируются в сторону уменьшения размеров, при этом подпороговые характеристики приборов будут ухудшаться. В общем случае необходимо более сильное легирование канала, чтобы получить приемлемые пороговое напряжение и наклон подпороговой характеристики [12].

Параметры конструкции n-канальных КНИ МОП-транзисторов

Параметр	FinFET	П-затвор	Ω-затвор	Кольцевой затвор
Ширина канала W , нм	$150 = W = 2H_b$	$150 = W = 2H_b + W_b$	$150 = W \approx 2H_b + W_b$	$150 = W = 2H_b + 2W_b$
Длина канала L , нм	50	50	50	50
Высота базы H_b , нм	75	50	50	37,5
Ширина базы W_b , нм	20	50	50	37,5
Толщина слоя оксида T_{ox} , нм	2	2	2	2

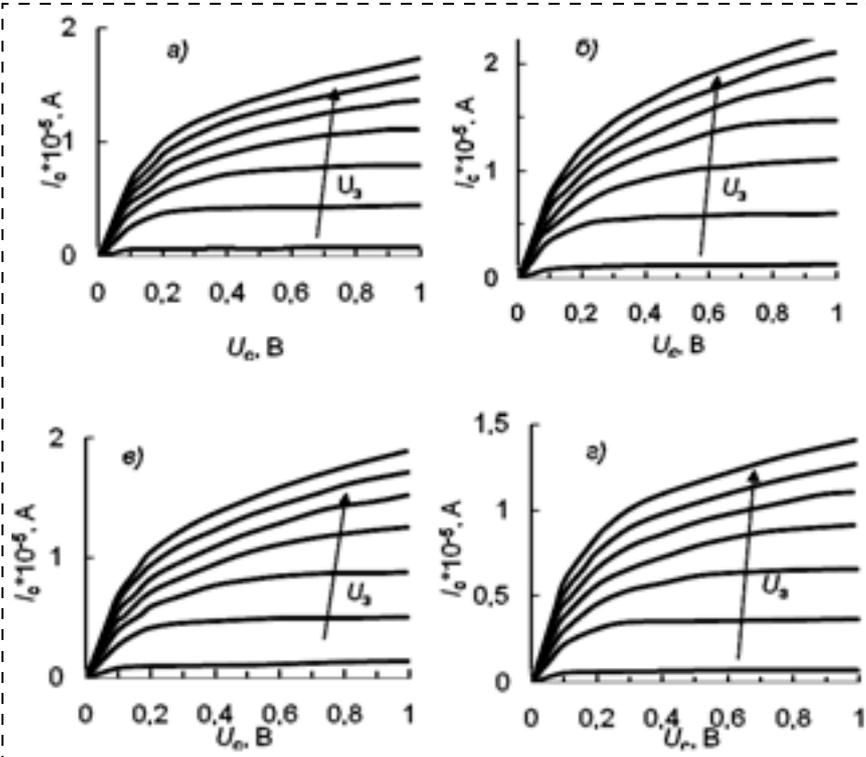


Рис. 2. Выходные характеристики КНИ МОП-транзисторов:

а — FinFET; б — П-затвор; в — Ω-затвор; г — кольцевой затвор; $U_3 = 0,1 \div 1,5$ В

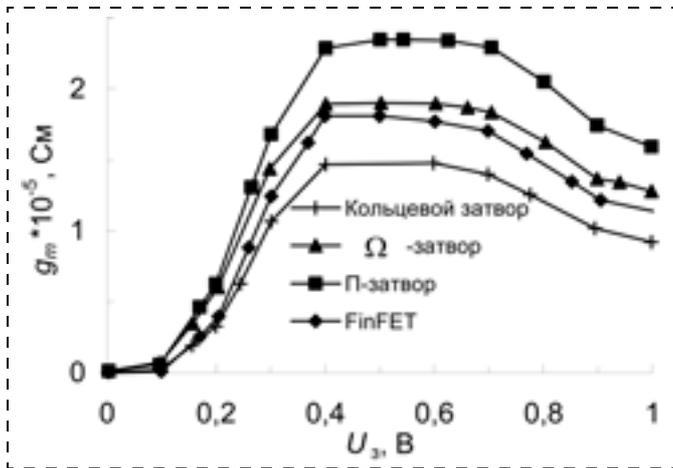


Рис. 3. Зависимость крутизны передаточной характеристики КНИ МОП-транзистора от смещения на затворе; $U_c = 0,8$ В

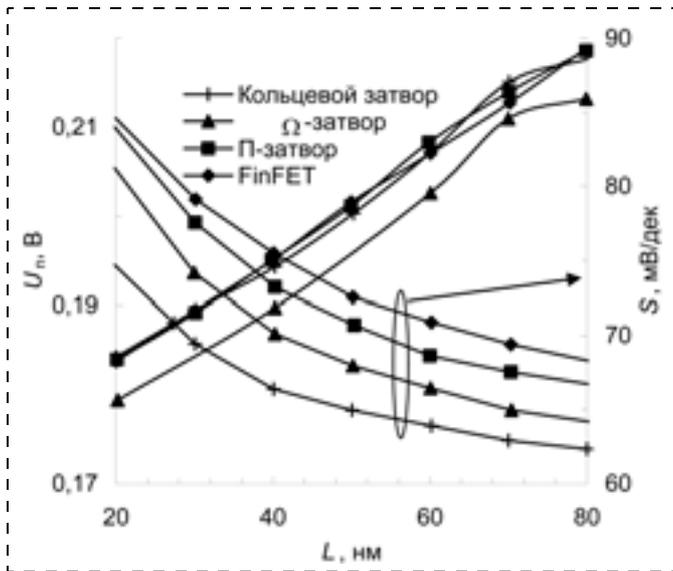


Рис. 4. Зависимость порогового напряжения U_n и наклона S подпороговой характеристики КНИ МОП-транзисторов от длины затвора; $U_c = 0,1$ В

Так как длина затвора уменьшается, токи утечки увеличиваются, поэтому для их снижения приборы должны иметь меньший наклон подпороговой характеристики. Эффект понижения потенциального барьера на истоке индуцированного проникновением поля стока (*DIBL*, drain induced barrier lowering), для подобных приборов значительно усиливается.

Миниатюризация сказывается на увеличении быстродействия приборов, однако также необходимо оптимизировать конструкцию КНИ МОП-транзистора для получения приемлемых значений других его характеристик. В связи с этим проведено исследование влияния изменения длины затвора, геометрии базы и легирования канала на пороговое напряжение, подпороговый наклон и *DIBL*-эффект КНИ МОП-транзисторов.

На рис. 4 приведена зависимость порогового напряжения и наклона подпороговой характеристики КНИ МОП-транзисторов от длины затвора.

В каждом случае наклон характеристики уменьшается с увеличением длины и числа затворов. Приборы показывают приемлемое значение наклона ха-

рактеристики даже при длине затвора менее 30 нм. Пороговое напряжение у всех исследуемых структур снижается на ~20 % при уменьшении длины затвора от 80 до 20 нм. Видно, что уменьшение длины затвора сказывается на увеличении наклона подпороговой характеристики и одновременном уменьшении порогового напряжения. Это объясняется тем, что затвор меньшей длины обеспечивает меньший контроль затвора над областью канала. Пороговое напряжение изменяется практически одинаково для всех приборов, а подпороговый наклон у транзистора с кольцевым затвором меньше во всем диапазоне изменения длины затвора. В целом результаты, приведенные на рис. 4, показывают хорошую корреляцию с результатами работы [8].

Влияние изменения длины затвора на *DIBL*-эффект показано на рис. 5. Видно, что транзистор с кольцевым затвором показывает меньший *DIBL*-эффект по сравнению с остальными приборами, что объясняется лучшим контролем области канала.

На рис. 6 приведены зависимости порогового напряжения и наклона подпороговой характеристики от ширины базовой области КНИ МОП-транзисторов. Подпороговый наклон увеличивается с ростом ширины базы для всех транзисторов. Следует под-

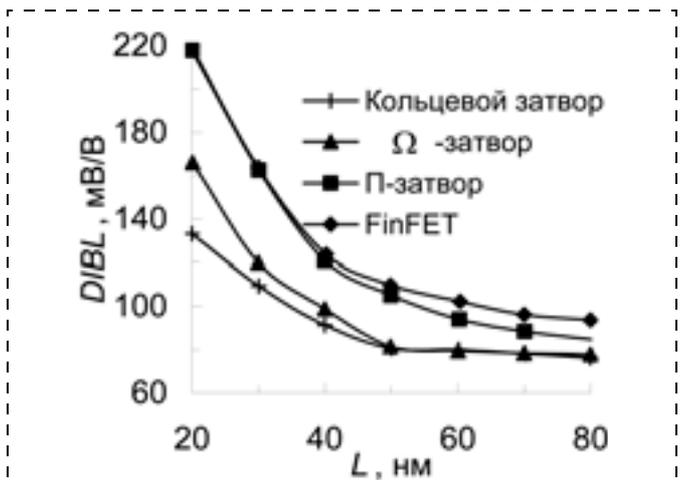


Рис. 5. Зависимость *DIBL*-эффекта от длины затвора; $U_c = 0,1$ и 1,5 В

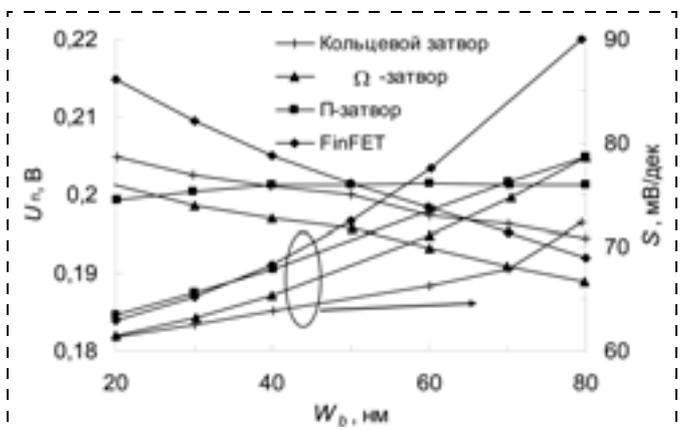


Рис. 6. Зависимость порогового напряжения и подпорогового наклона КНИ МОП-транзисторов от ширины базовой области; $U_c = 0,1$ В

черкнуть важность большего числа затворов для улучшения работы прибора [5]. При малой ширине базовой области все приборы показывают близкие значения подпорогового наклона.

Была исследована зависимость *DIBL*-эффекта от ширины базовой области (рис. 7). Видно, что транзистор с кольцевым затвором не показывает лучшее подавление *DIBL*-эффекта, хотя подпороговый наклон у него наилучший.

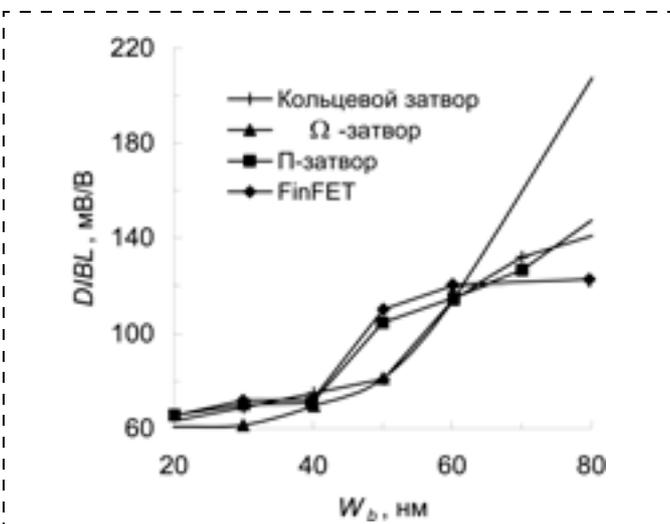


Рис. 7. Зависимость *DIBL*-эффекта от ширины базовой области; $U_c = 0,1$ и $1,5$ В

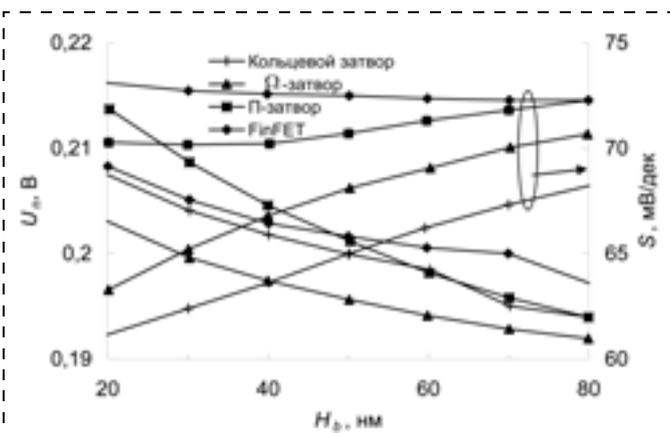


Рис. 8. Зависимость порогового напряжения и наклона подпороговой характеристики КНИ МОП-транзисторов от высоты базовой области; $U_c = 0,1$ В

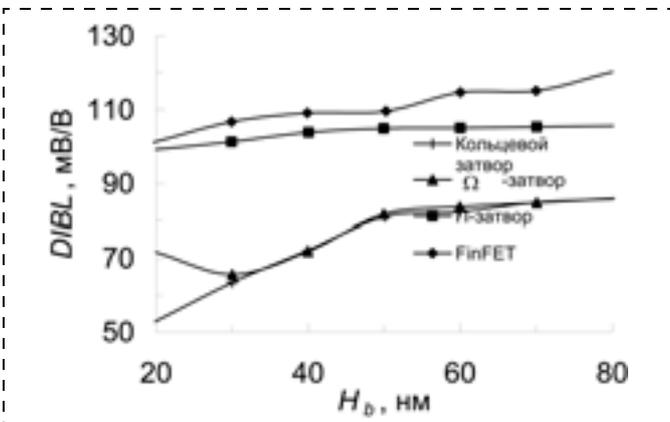


Рис. 9. Зависимость *DIBL*-эффекта от высоты базовой области; $U_c = 0,1$ В

Влияние изменения высоты базовой области на пороговое напряжение и наклон подпороговой характеристики КНИ МОП-транзисторов показано на рис. 8.

Видно, что пороговое напряжение незначительно уменьшается с увеличением высоты базы. В тонких кремниевых пленках обедненный заряд, контролируемый затвором, очень мал и увеличение высоты базы слабо влияет на пороговое напряжение. При очень малых значениях высоты базы необходимо учитывать емкость переходов стока и истока. Подпороговый наклон снижается с уменьшением высоты базы, и только для FinFET транзистора имеет место обратная зависимость. Полученные результаты отражают тот факт, что транзисторы с большим числом затворов лучше подавляют короткоканальные эффекты [2]. На рис. 9 показана зависимость *DIBL*-эффекта от высоты базовой области.

Легирование области канала приводит к увеличению порогового напряжения и обычно применяется для подавления короткоканальных эффектов, возникающих при уменьшении длины затвора. Была исследована зависимость порогового напряжения и подпорогового наклона от уровня легирования канала (рис. 10).

Видна общая зависимость — снижение подпорогового наклона с увеличением уровня легирования и числа затворов. На рис. 11 приведена зависимость *DIBL*-эффекта от уровня легирования канала. Аналогично подпороговому наклону (см. рис. 10) *DIBL*

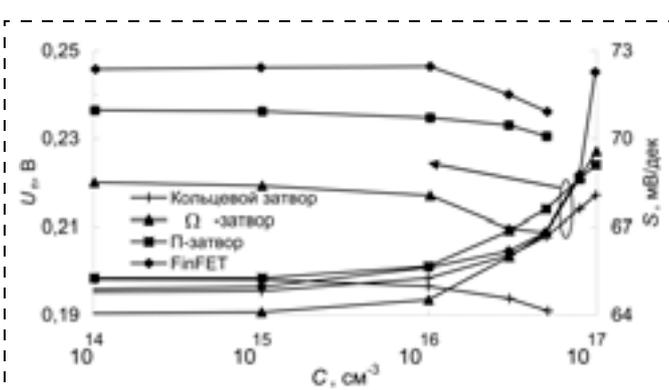


Рис. 10. Зависимость порогового напряжения и подпорогового наклона КНИ МОП-транзисторов от уровня легирования канала; $U_c = 0,1$ В

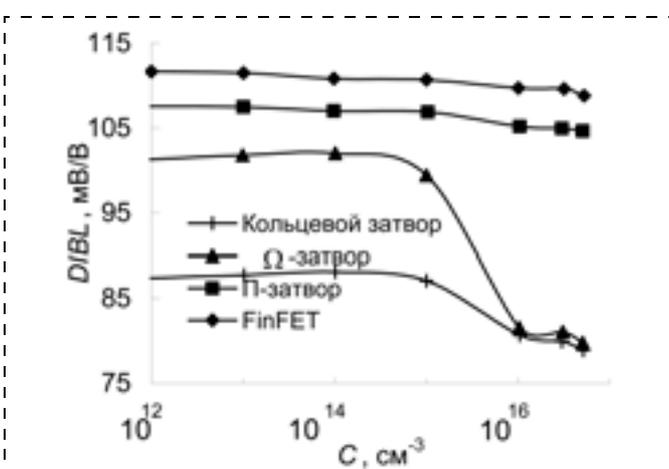


Рис. 11. Зависимость *DIBL*-эффекта от уровня легирования канала; $U_c = 0,1$ В

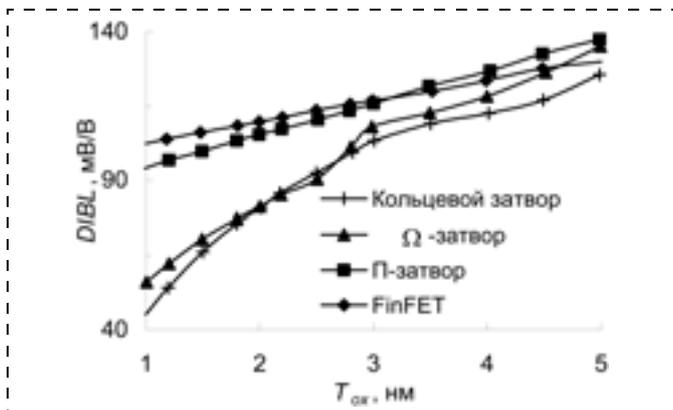


Рис. 12. Зависимость $DIBL$ -эффекта от толщины затворного оксида; $U_c = 0,1$ В

уменьшается при увеличении уровня легирования канала и при увеличении числа затворов транзистора.

Толщина подзатворного оксида — это еще один параметр, влияющий на характеристики МОП-транзистора, в том числе изготовленного по КНИ-технологии. Рост порогового напряжения (вследствие увеличения токов утечки) при уменьшении толщины оксида с 5 до 1 нм для исследуемых транзисторов составил 3–5 %. Подпороговый наклон при этом линейно снижается на 10–12 %.

При уменьшении толщины затворного оксида снижается $DIBL$ -эффект (рис. 12). Транзисторы с Ω и кольцевым затворами показывают лучшие характеристики, особенно при малых толщинах подзатворного оксида.

Заключение

Проведено приборно-технологическое моделирование влияния изменения геометрии затворной

композиции на характеристики КНИ МОП-транзисторов разной конструкции. Все устройства показали приемлемые характеристики и могут быть альтернативой планарным КНИ МОП-транзисторам. Результаты, полученные в работе, показали хорошее совпадение с описанными в литературе экспериментальными данными.

Список литературы

1. Королев М. А., Крупкина Т. Ю., Чаплыгин Ю. А. Приборно-технологическое моделирование при разработке изделий микроэлектроники и микросистемной техники // Изв. вузов. Электроника. 2005, № 4–5. С. 64–71.
2. Celler G. K. Frontiers of silicon on insulator // J. Appl. Phys. 2003. Vol. 93, N 9. P. 4955–4978.
3. Наумова О. В., Антонова И. В., Попов В. П. др. Нанотранзисторы кремний-на-изоляторе: перспективы и проблемы реализации // ФТП. 2003. Т. 37, № 10. С. 1253–1259.
4. Colinge J. P. Multiple-gate SOI MOSFETs // Solid State Electron. 2004. Vol. 48, N 6. P. 897–905.
5. Chau R., Doyle B., Kavalieros J. et al. Advanced depleted-substrate transistors: Single-gate, double-gate and tri-gate // Proc. SSDM, Japan. 2002. P. 68–69.
6. Doyle B. S., Datta S., Doczy M. et al. High performance fully-depleted Tri-Gate CMOS transistors // IEEE Electron Device Letters. 2003. Vol. 24, N 4. P. 263–265.
7. Fu-Liang Yang, Hao-Yu Chen, Fang-Cheng Chen et al. 25nm CMOS Omega FETs // Proc. IEDM Technical Digest. 2002. P. 255–258.
8. Park J. T., Colinge J. P. Multiple-gate SOI MOSFETS: Device design guidelines // IEEE Trans. Electron Devices. 2002. Vol. 49. P. 2222–2229.
9. Pei G., Kedzierski J., Oldiges P. et al. FinFET design considerations based on 3-D simulation and analytical modeling // IEEE Transactions on Electron Devices. 2002. Vol. 49. P. 1411–1419.
10. <http://bwrc.eecs.berkeley.edu/Classes/IcBook/SPICE/>
11. <http://www.silvaco.com>
12. Технология СБИС. В 2 кн.: Пер. с англ. / Под ред. С. Зи. М.: Мир, 1986.

Информация

КОМПАНИИ NXP И INTRINSIC-ID СОВМЕСТНЫМИ УСИЛИЯМИ ПОДНИМАЮТ ПЛАНКУ В ОБЛАСТИ БЕЗОПАСНОСТИ МИКРОСХЕМ

*Усовершенствование защищенной аутентификации электронных устройств
за счет встроенных аппаратных средств защиты*

САН-ХОСЕ, КАЛИФОРНИЯ (США), 20 января 2010 г. Компания NXP, ведущий поставщик полупроводников для решений по обеспечению безопасности, и компания Intrinsic-ID, молодая компания-поставщик интеллектуальной собственности и услуг в области полупроводников, сегодня объявили о заключении договора о сотрудничестве, предусматривающего лицензирование и внедрение встроенных аппаратных средств защиты (hardware intrinsic security — HIS) в следующее поколение технологии защищенных микросхем NXP SmartMX™. Это партнерство позволит компании NXP применять решение Quiddikey™ компании Intrinsic-ID для обеспечения защиты решений на базе микросхем SmartMX от несанкционированного клонирования, изменения, использования без оплаты и инженерного анализа.

Полный текст на сайте

<http://www.ru.nxp.com/news/pressreleases/index.html>

УДК 531.975

Е. Д. Мишина¹, д-р физ.-мат. наук, доц., проф.,
e-mail: mishina_elend57@mail.ru,

А. С. Сигов¹, д-р физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН,
ректор., e-mail: rector@mirea.ru,

Е. В. Казанцева^{1, 2}, канд. физ.-мат. наук,
вед. инж., e-mail: kazantseva@gmail.com,

В. М. Мухортов³, д-р физ.-мат. наук, вед. научн.,
сопр., e-mail: muhortov@rambler.ru

¹ Московский институт радиоэлектроники
и автоматики (технический университет)

² Национальный исследовательский ядерный
университет "МИФИ"

³ Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону

ВОЗБУЖДЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА В ТОНКОЙ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛЕНКЕ

Проведено экспериментальное исследование динамики поляризации в тонкой сегнетоэлектрической пленке под действием электрического импульса. Затухание поляризации в тонкой пленке сопровождается осцилляциями около равновесного положения, это явление качественно описывается на основе феноменологической теории Гинзбурга.

Ключевые слова: сегнетоэлектрики, тонкие пленки, быстропотекающие переходные процессы, переключение поляризации электрическим импульсом

Введение

К настоящему времени в литературе существует множество работ, посвященных исследованию электрофизических свойств сегнетоэлектрических материалов. Интерес к сегнетоэлектрикам обусловлен тем, что возможность изменения диэлектрической постоянной сегнетоэлектрика при воздействии электрического поля позволяет создавать управляемые электрическим сигналом сверхбыстрые преобразователи амплитуды и фазы. Существуют значительные преимущества для использования сегнетоэлектрических материалов при создании переключающих и управляющих элементов, а также компактных конденсаторов благодаря высокой диэлектрической постоянной и малым потерям. Тонкие сегнетоэлектрические пленки особенно интересны для использования в сверхкомпактных устройст-

вах с пониженным энергопотреблением. В идеале варьирование свойств подложек, на которых выращиваются пленки, и подбор концентрации твердых сегнетоэлектрических растворов позволяют создавать сегнетоэлектрические пленки с заданными частотными и температурными характеристиками. Исследование влияния толщины пленки на свойства сегнетоэлектриков проведено в работе [1].

Эксперимент по изучению быстрого переключения поляризации в сегнетоэлектрической пленке BST под действием короткого электрического импульса [2] показал, что после прохождения электрического импульса возникают осцилляции поляризации в тонкой пленке сегнетоэлектрика, в работе оценено время затухания поляризации до равновесного значения. Частота колебаний поляризации в тонкой пленке определяется ее свойствами и может быть определена на основе феноменологической модели Гинзбурга—Ландау [3—5]. При наличии постоянного электрического поля внутри сегнетоэлектрической пленки возникает стационарная поляризация, ее значение определяется амплитудой приложенного к пленке поля. Присутствие дефектов и наличие поверхностных напряжений на границе пленки с подложкой также меняет распределение поляризации внутри пленки. В работе [6] было проведено теоретическое исследование зависимости частоты и времени переключения поляризации в сегнетоэлектрической пленке от управляющего электрического сигнала.

В данной работе проведен и описан эксперимент по изучению отклика тонкой сегнетоэлектрической пленки твердого раствора $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ (BST) с концентрацией бария $x = 0,7$. Феноменологически температура Кюри для твердого раствора BST может быть оценена по формуле $T_c = 360x + 40$ (K), предложенной в работе [7], здесь x — концентрация бария. Для исследуемых в данной работе образцов с концентрацией бария $x = 0,7$ температура Кюри T_c приблизительно равна 292 K. Эта температура очень близка к комнатной температуре, при которой проводились измерения. В области около фазового перехода физические свойства сегнетоэлектриков резко меняются, поэтому исследование характеристик сегнетоэлектрических пленок с различными свойствами представляет значительный интерес. По некоторым предположениям [8] размытие фазового перехода для твердых растворов сегнетоэлектриков обусловлено различием локальных температур Кюри, вызванным локальными флуктуациями концентрации различных компонентов, а также диффузией заряженных дефектов, приводящей к закреплению границ полярных областей.

Основным результатом, полученным экспериментально и интерпретированным на основе фено-

менологической теории Гинзбурга—Ландау, является возникновение высокочастотных колебаний ($10^8 \dots 10^{10}$ рад/с) поляризации тонкой сегнетоэлектрической пленки при включении платообразного электрического импульса с крутым фронтом. На основании феноменологического описания сделана оценка максимальной частоты колебаний поляризации.

Описание эксперимента

Для исследования динамики переключения поляризации тонкой сегнетоэлектрической пленки были взяты образцы эпитаксиальных пленок титаната бария-стронция, выращенных на подложке MnO методом высокочастотного распыления. Толщина исследуемых пленок составляет 140 нм. Существуют отработанные экспериментальные методики диагностики отклика поляризации в среде. Одним из них является метод регистрации генерируемой в веществе второй оптической гармоники, подробное описание схемы установки дано в работе [2]. В настоящей работе проведена экспериментальная диагностика поляризационного отклика тонкой сегнетоэлектрической пленки BST методом генерации второй оптической гармоники. Длина волны излучения титан-сапфирового лазера составляет 760 нм.

Генерация второй гармоники (ВГ) относится к нелинейно-оптическим эффектам. Вторая гармоника возникает при прохождении электромагнитного излучения через нецентросимметричную среду. Так, в неполяризованной сегнетоэлектрической пленке без центра инверсии среды вторая гармоника не будет генерироваться. Под действием приложенного электрического поля в сегнетоэлектрике возникает наведенная поляризация, приводя к изменению свойств симметрии среды [9]. Таким образом, можно диагностировать изменение поляризации среды по изменению интенсивности сигнала ВГ. На рис. 1 (см. третью сторону обложки) проиллюстрирована зависимость интенсивности ВГ, полученная в квазистатическом режиме, от значения приложенного к сегнетоэлектрической пленке электрического поля. Интенсивность второй гармоники на рис. 1, б приведена в безразмерных единицах.

Переключение поляризации в тонкой пленке осуществляется ступенькообразным электрическим импульсом. На рис. 2, а (см. третью сторону обложки) проиллюстрирован временной профиль электрического импульса, подаваемого на тонкую пленку для изучения поляризационного отклика сегнетоэлектрика. Длительность фронта импульса составляет примерно 10 нс, а длительность самого импульса около 5 мкс. На рис. 2, б показан график изменения интенсивности второй гармоники со временем. Этот график характеризует динамику поляризации тонкой пленки под действием приложенного электрического поля. Увеличение электрического поля приводит к росту интенсивности второй гармоники, достигающей максимального значения при выходе электрического импульса на стационарное значение. При достижении электрическим полем постоянного значения (выход на плато) поляризация среды испытывает затухающие колебания около

равновесного положения. Период колебаний поляризации в сегнетоэлектрической пленке равен приблизительно 150 нс.

Для качественного описания отклика сегнетоэлектрика на включение электрического поля рассмотрим подход, развитый Гинзбургом в работе [5]. Динамика поляризации сегнетоэлектрика под действием электрического импульса описывается уравнением осциллятора во внешнем поле E (см. формулу (49) в работе [5]):

$$\mu P_{tt} + \nu P_t + \alpha P + \beta P^3 = E,$$

здесь параметр μ обратно пропорционален квадрату частоты собственных колебаний в кристалле; ν — коэффициент затухания, значение которого мало; α и β — параметры Ландау, их значения для сегнетоэлектрика $\text{Ba}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{TiO}_3$ составляют приблизительно $\alpha = 2 \cdot 10^{-5}$ и $\beta = 1,5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3/\text{Дж}$ в единицах СГС.

В отсутствие внешнего электрического поля существуют два стационарных значения поляризации в сегнетоэлектрической фазе, определяющихся выражением

$$P_0 = \pm \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}},$$

кроме того еще существует неустойчивое положение равновесия $P = 0$.

В паразитической фазе в отсутствие внешнего поля возможно только неполяризованное равновесное состояние $P = 0$. Если к сегнетоэлектрику приложено постоянное поле E_0 , то стационарная поляризация P_0 меняется в зависимости от амплитуды электрического поля. Стационарная поляризация определяется из уравнения для осциллятора при равенстве нулю всех динамических слагаемых, так что

$$\alpha P_0 + \beta P_0^3 = E_0,$$

а при малых нелинейностях

$$P_0 = \sqrt{E_0/\alpha}.$$

Очень приближенно можно определить частоту ω осцилляций поляризации, полагая $P = p e^{i\omega t}$:

$$\omega \approx \sqrt{\mu\alpha} \approx \omega_b \sqrt{\alpha},$$

где ω_b — так называемая борцовская частота, определяемая параметрами кристаллической решетки.

В сегнетоэлектрическом кристалле максимальная частота колебаний решетки составляет примерно $10^{12} \dots 10^{13} \text{ с}^{-1}$. Тогда приближительная оценка для максимального значения частоты колебаний поляризации в пленке BST составляет $4,5(10^9 \dots 10^{10}) \text{ с}^{-1}$. Минимальная частота колебаний в кристалле зависит от размеров кристалла. Затухание высокочастотных колебаний происходит быстрее, поэтому можно ожидать, что частота осцилляций поляризации будет уменьшаться со временем, т. е. с уменьшением амплитуды затухающей осциллирующей поляризации. Согласно работам [11, 12] частота мягкой моды сегнетоэлектрика определяется формулой, совпадающей с примерной оценкой частоты осцилляций поляризации по теории Гинзбурга. Можно предположить, что колебания поляризации под действием импульса с крутым фронтом отвечают возбуждению мягкой моды. Время затухания отклика поляриза-

ции не может быть точно оценено из графика, приведенного на рис. 2, а (см. третью сторону обложки), но как минимум оно составляет несколько периодов колебаний неравновесной поляризации.

Заключение

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование динамики поляризации в тонкой сегнетоэлектрической пленке под действием электрического импульса, соответствующего ступенькообразному изменению напряженности электрического поля от нуля до 15 В. При этом состояние поляризации тонкой пленки резко меняется под действием управляющего электрического импульса и постепенно релаксирует к равновесному значению, соответствующему постоянной напряженности приложенного поля. Переход к равновесному значению поляризации сопровождается осцилляциями около равновесного положения с частотой порядка десятков гигагерц.

Работа поддержана грантом РФФИ 09-02-12439-офи-м.

Список литературы

1. Мухортов В. М., Колесников В. В., Головки Ю. И., Бирюков С. В., Маматов А. А., Юзюк Ю. И. Геометрические эффекты в наноразмерных эпитаксиальных пленках

титаната бария-стронция // Журнал технической физики. 2007. Т. 77, вып. 10. С. 97–102.

2. Mishina E. P., Sherstyuk N. E., Stadnichuk V. I., Sigov A. S., Mukhorotov V. M., Golovko Yu. I., Etteger A., Rasing Th. Non-linear-optical probing of nanosecond ferroelectric switching // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 83, N 12. P. 2402–2404.

3. Гинзбург В. Л. // ЖЭТФ. 1945. Т. 15. С. 739.

4. Гинзбург В. Л. // ЖЭТФ // 1949. Т. 19. С. 36.

5. Гинзбург В. Л. Теория сегнетоэлектрических явлений // УФН. 1949. Т. 38. С. 490–525.

6. Caputo J.-G., Kazantseva E. V., Maimistov A. I. Electromagnetically induced switching of ferroelectric thin films // Phys. Rev. B 2007. V. 75. 014113.

7. Lemanov V. V. Concentration dependence of phonon mode frequencies and the Grüneisen coefficients in Ba_xSr_{1-x}TiO₃ solid solutions // Phys. Solid State. 1997. V. 39. P. 318–322.

8. Gopalan V., Raj R. Domain structure and phase transitions in epitaxial KNbO₃ thin films studied by in situ second harmonic generation measurements // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 68, N 10. P. 1323–1325.

9. Пронин И. П., Аязбаев Т., Зайцева Н. В., Шаплыгина Т. А., Юсупов В. А. Особенности размытия сегнетоэлектрического фазового перехода в твердых растворах ферровольфрамата-титана свинца // Журнал технической физики 1997. Т. 67, N 4. С. 140–142.

10. Ban Z.-G., Alpay S. P. Phase diagrams and dielectric response of epitaxial barium strontium titanate films: A theoretical analysis // Journal of Appl. Phys. 2002. V. 91, N 11. P. 9288–9296.

11. Scott J. F. Soft-mode spectroscopy: Experimental studies of structural phase transitions // Rev. Mod. Phys. 1974. V. 46. P. 83–128.

12. Dawber M., Rabe K. M., Scott J. F. Physics of thin-film ferroelectric oxides // Rev. Mod. Phys. 2005. V. 77. P. 1083–1130.

УДК 621.3.049.7

П. Г. Бабаевский¹, д-р техн. наук, проф.,

А. А. Жуков², д-р техн. наук, доц.,

А. С. Корпунин², аспирант,

Г. М. Резниченко¹, канд. техн. наук, доц.,

¹ ГОУ ВПО "МАТИ" — Российский

государственный технологический университет имени К. Э. Циолковского, г. Москва,

² ОАО "Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем", г. Москва, E-mail: design-center@rnii.kp.ru

ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОЛИИМИД-КРЕМНИЕВЫХ УПРУГО-ШАРНИРНЫХ МИКРОСТРУКТУР

Исследованы деформационно-прочностные свойства при растяжении полиимидно-кремниевых трапецевидных упруго-шарнирных микроструктур, модифицированных армированием в нижней части полиимидного слоя функционализированными одностенными углеродными трубками и нанесением на поверхность кремния тонких слоев кремнийорганического соединения, алюминия и системы ванадий—никель. Показано, что армирование полиимида введением нанотрубок во всех случаях повышает деформационно-прочностные характеристики микроструктур.

Ключевые слова: полиимид, кремний, трапецевидная упруго-шарнирная микроструктура, микроэлектромеханическая система, коэффициент термического линейного расширения, одностенные углеродные нанотрубки

Введение

Создание методами объемной микрообработки упруго-шарнирных микроструктур из материалов с различной механической и тепловой деформативностью рассматривается в настоящее время как одно из наиболее перспективных направлений при формировании подвижных исполнительных элементов микроэлектромеханических систем (МЭМС) [1, 2]. Один из возможных типов таких микроструктур представляет собой плоские трапецевидные элементы из жесткого материала, в первую очередь, кремния, традиционно применяемого в технологии МЭМС. Эти элементы адгезионно связаны между собой слоем полимера, обладающего существенно более низкими значениями модуля упругости и более высокими значениями коэффициента термического расширения и обеспечивающего термомеханический и шарнирный эффекты. Перспективным материалом для создания такого слоя служит полиимид (ПИ), обладающий высокими и легко регулируемые технологическими свойствами, тепло- и термостойкостью, необходимыми в технологии МЭМС, в сочетании с достаточно высокими жесткостью, прочностью и термическим коэффициентом линейного расширения [3–8]. Решающую роль

в обеспечении работоспособности полимер-кремниевых упруго-шарнирных микроструктур играют их деформационно-прочностные свойства, определяемые, в первую очередь, механическими свойствами полимерного слоя и прочностью его адгезионной связи с жесткими трапецевидными элементами, которые можно регулировать армированием полимера и модифицированием поверхности жестких элементов с нанесением дополнительного (промежуточного) слоя. В данной работе представлены результаты исследований деформационно-прочностных свойств при растяжении ПИ-кремниевых трапецевидных упруго-шарнирных микроструктур в зависимости от армирования контактирующей с кремнием нижней части слоя ПИ модифицированными одностенными углеродными нанотрубками (ОУНТ) и от нанесения на поверхность кремния, после его стандартной химической обработки, тонких слоев кремнийорганического соединения (γ -аминопропилтриэтоксисилана (АПТЭС)), алюминия (Al) и системы металлов ванадий—никель (V—Ni).

Экспериментальная часть

Для проведения исследований изготавливали образцы ПИ-кремниевых трапецевидных упруго-шарнирных микроструктур, микрофотографии общего вида которых и схематические изображения элемента (модуля), используемого для испытания на растяжение, приведены на рис. 1 и 2 соответственно.

Общая высота профиля микроструктур по сечению составляла 160...165 мкм, причем толщина слоя ПИ варьировалась на различных участках профиля от 10 до 13 мкм. Ширина и длина элементов в плоскости составляла 3,2 мм и 5,0 мм соответственно.

Исходные многомодульные блоки ПИ-кремниевых трапецевидных упруго-шарнирных микроструктур получили методами объемной микрообработки. В пластинах монокристаллического кремния с ориентацией (100) методами фотолитографии и жидкостного анизотропного травления формировали многомодульные микроструктуры, состоящие из набора (от 5 до 7) параллельных V-образных каналов, вытравленных на глубину 170 мкм на расстоянии приблизительно 300 мкм друг от друга. Поверхность кремниевых структур после стандартной химической обработки модифицировали тремя различными способами: обработкой АПТЭС — нанесением его на центрифуге с последующей термообработкой и магнетронным напылением слоев металлов (Al и V—Ni) толщиной не более 100 нм. На подготовленные таким образом поверхности кремниевых пластин с микроструктурами методом центрифугирования наносили раствор преполимера в диметилацетамиде одинаковой концентрации полиамидокислоты (ПАК) на основе пиромеллитового диангирида и оксидаанилина: сначала наносили тонкий слой раствора толщиной 2...3 мкм с содержанием ОУНТ, модифицированных карбоксильными группами 0 %, 1,25 % и 2,5 % (в расчете на раствор ПАК), который подсушивали при 70 ± 5 °С в течение 20 мин, а затем на него наносили более толстый (7...10 мкм) слой той же концентрации раство-

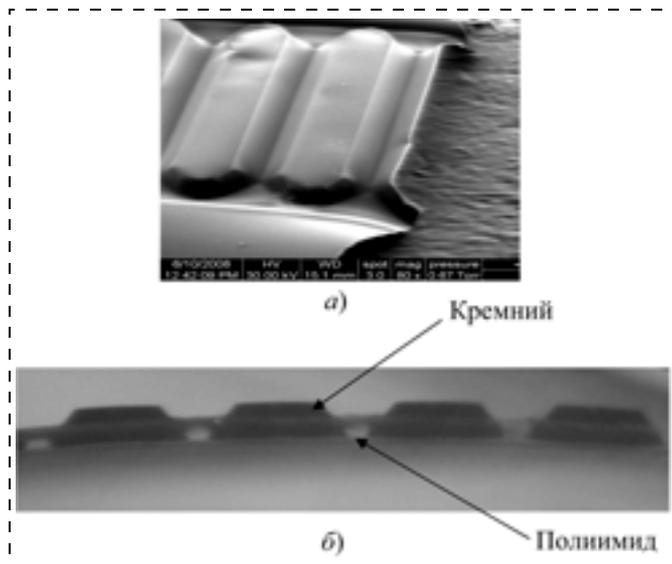


Рис. 1. Микрофотографии ПИ-кремниевых трапецевидных упруго-шарнирных микроструктур: а — вид сверху; б — вид с торца

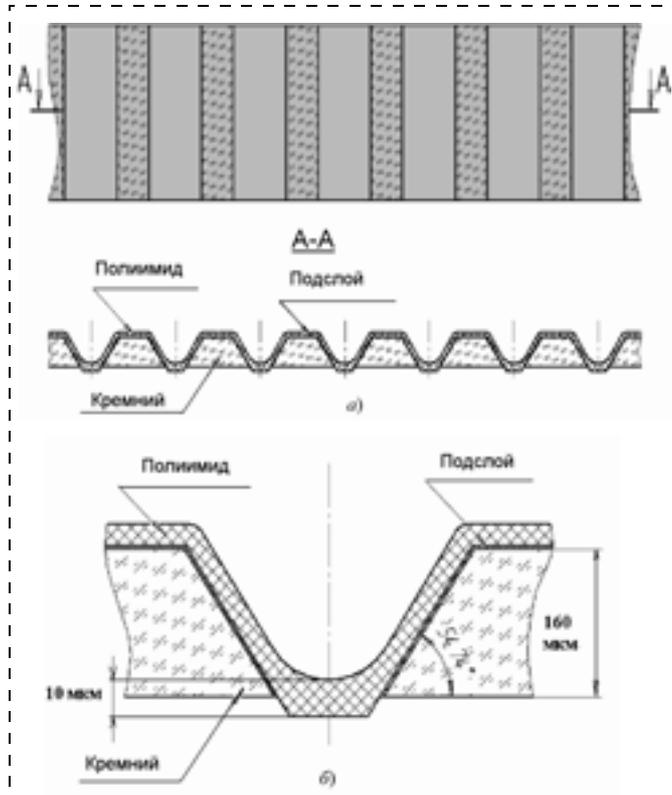


Рис. 2. Схематические изображения элемента (модуля) для испытания на растяжение ПИ-кремниевых трапецевидных упруго-шарнирных микроструктур:

а — вид сверху и в сечении по А-А; б — увеличенное сечение профиля слоя ПИ, соединяющего трапецевидные кремниевые элементы

ра ПАК, не содержащего нанотрубок. Нанесенный общий слой раствора ПАК подвергали сушке при температуре 120 ± 5 °С в течение 30 мин и термоимидизации при 250 ± 5 °С в течение 30 мин. Далее пластины монокристаллического кремния с многомодульными блоками ПИ-кремниевых микроструктур подвергали утонению методом плазмохимического травления с противоположной стороны до появления

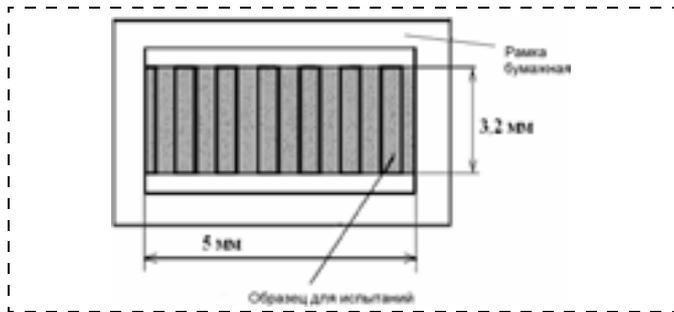


Рис. 3. Схематическое изображение отдельного элемента, вклеенного в бумажную рамку

параллельных слоев ПИ на месте дна V-образных канавок, разделяющих и адгезионно связывающих трапециевидные элементы. Многомодульные блоки ПИ-кремниевых микроструктур разделяли на отдельные модули (рис. 2), которые и служили образцами для механических испытаний при растяжении.

Для определения деформационно-прочностных свойств отдельных образцов ПИ-кремниевых трапециевидных упруго-шарнирных микроструктур их вклеивали в бумажные рамки (рис. 3).

После закрепления в зажимах разрывной машины "INSTRON" боковые стороны рамки разрезали, и образцы микроструктур нагружали со скоростью 1 мм/мин вплоть до разрушения, записывая диаграммы "нагрузка F — перемещение зажимов разрывной машины δ " при скорости движения диаграммной ленты 100 мм/мин. Для испытаний использовали не менее четырех образцов каждого типа.

Геометрические размеры образцов до и после разрушения, характер и место их разрушения исследовали методами оптической микроскопии с использованием микроскопа Axio Imager фирмы Carl Zeiss (Германия).

Результаты и их обсуждение

Пример типичной диаграммы нагрузка—перемещение (F — δ), записанной на диаграммной ленте разрывной машины, для одного из образцов трапециевидных упруго-шарнирных микроструктур ПИ-кремний, а также две типичные микрофотографии образцов после разрушения представлены на рис. 4 и 5 соответственно.

Обобщенный анализ большого числа диаграмм разрушения и микрофотографий разрывов образцов свидетельствует, что при растяжении упруго-шарнирных микроструктур ПИ-кремний на начальных стадиях нагружения происходит преимущественно растяжение слоя ПИ в его нижней узкой (свободной) части с отклонением от линейности между силой и деформацией при сравнительно малых нагрузках и проявлением предела и зоны текучести слоя ПИ при возрастании деформации. При дальнейшем деформировании происходит отслаивание слоя ПИ от боковых поверхностей трапециевидных кремниевых балок. Отслаивание протекает ступенчато, с прохождением нагрузки через ряд пиков и спадов. Окончательный разрыв слоя происходит преимущественно в направлении, перпендикулярном направлению действия нагрузки, т. е. вдоль оси кремние-

вых балок, и резе — в направлении, перпендикулярном оси балок. Разрыв слоя ПИ обычно происходит вблизи верхнего края кремниевой балки, где наблюдается резкое возрастание локальных напряжений. Ступенчатый характер изменения нагрузки хорошо известен при отслаивании тонких покрытий от твер-

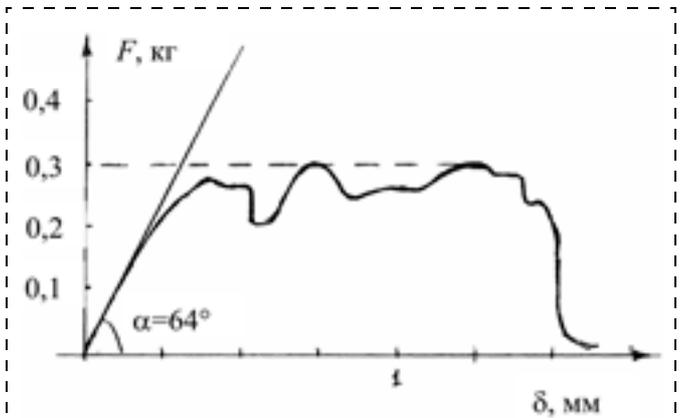
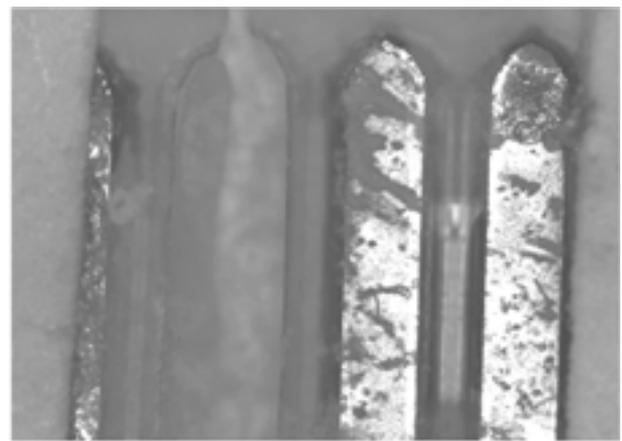
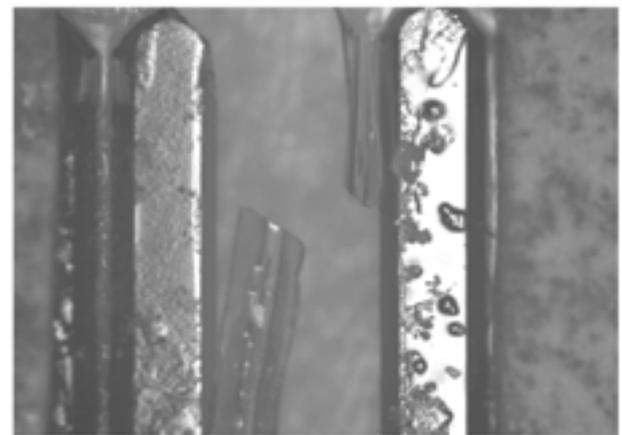


Рис. 4. Диаграмма "нагрузка—перемещение зажимов разрывной машины" для образца трапециевидной упруго-шарнирной микроструктуры на основе кремния с нанесенным на поверхность слоем V—Ni толщиной 100 нм и слоя ПИ, армированного 1,25 % ОУНТ



а)



б)

Рис. 5. Микрофотографии (вид сверху) типичных разрывов образцов трапециевидных упруго-шарнирных микроструктур ПИ-кремний вблизи верхнего края кремниевой балки:

а — вдоль оси балок; б — вдоль и поперек оси балок

Средние значения, рассчитанные по диаграммам разрушения (погрешность расчетов не более 10 %) параметров деформационно-прочностных свойств при растяжении образцов модифицированных трапецевидных упруго-шарнирных микроструктур при средней толщине слоев ПИ 10...12 мкм

Характеристики образцов	Модификация поверхности кремния								
	Обработка АПТЭС			Металлизация					
				Al			V—Ni		
Содержание ОУНТ в нижнем слое ПИ, масс. %	0	1,25	2,5	0	1,25	2,5	0	1,25	2,5
Усилие, соответствующее пределу текучести слоя ПИ, F_T , Н	1,7	2,7	2,4	0,9	1,1	1,6	2,1	1,5	1,4
Среднее усилие от начала отслаивания до разрыва слоя ПИ, F_p , Н	1,5	2,0	1,5	1,0	2,8	2,5	2,2	3,1	1,7
Общее удлинение образца при разрыве, Δl_K , мкм	8	17	25	15	27	20	23	43	13

дых поверхностей, а также при псевдохрупком разрушении клеевых соединений и слоистых композитов [9].

Для сравнительной характеристики деформационно-прочностных свойств при растяжении модифицированных различным образом ПИ-кремниевых трапецевидных упруго-шарнирных микроструктур по диаграммам разрушения были определены следующие показатели: усилие, соответствующее проявлению предела текучести слоя ПИ (F_T), среднее усилие начала отслаивания слоя ПИ от поверхности кремниевых балок до конечного его разрыва (F_p) и Δl_p — общее удлинение образца на конечной стадии разрыва слоя ПИ.

Определенные таким образом параметры деформационно-прочностных свойств при растяжении для образцов трапецевидных упруго-шарнирных микроструктур на основе кремния и ПИ, армированного и неармированного ОУНТ, при различном модифицировании поверхности кремния перед формированием слоя ПИ обобщены в таблице.

Сравнение результатов испытаний образцов трапецевидных упруго-шарнирных микроструктур при нулевой концентрации ОУНТ свидетельствует о значительном влиянии модификации поверхности кремния перед формированием слоя ПИ на их деформационно-прочностные свойства. При модификации поверхности кремния магнетронным распы-

лением металлов V—Ni и нанесением АПТЭС нагрузка, при которой происходит разрушение слоистых структур, и предельное удлинение образцов при растяжении существенно выше, чем в случае модификации поверхности кремния напылением Al. Армирование слоя ПИ, прилегающего к поверхности кремниевых балок, введением нанотрубок во всех случаях повышает деформационно-прочностные характеристики трапецевидных упруго-шарнирных микроструктур, причем введение нанотрубок в количестве 1,25 масс. % оказывается более эффективным, чем 2,5 масс. %.

Таким образом, обобщая полученные результаты исследования влияния армирования слоя ПИ модифицированными нанотрубками и нанесения на поверхность кремния слоев АПТЭС, Al и системы V—Ni на характер разрушения и деформационно-прочностные свойства при растяжении трапецевидных упруго-шарнирных микроструктур ПИ—кремний, можно сделать вывод, что с точки зрения повышения их надежности и долговечности необходимо наносить на поверхность кремния магнетронным распылением тонкий металлический слой (приблизительно 0,1 мкм), в частности системы металлов V—Ni, или модифицировать ее АПТЭС. Эффект армирования слоя ПИ, прилегающего к поверхности кремниевых балок, углеродными нанотрубками заметно проявляется при количестве последних не более 1,25 мас. %.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ офи-ц № 08-07-13552.

Список литературы

1. Гридчин В. А., Драгунов В. П. Физика микросистем. В 2 ч. Ч. 1. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2004. 416 с.
2. Gardner J., Varadan V., Awadelkarim O. Microsensors, MEMS and Smart Devices. Chichester: John Wiley & Sons, 2001. 503 p.
3. Ebefors T. Polyimide V-groove Joints for Three-Dimensional Silicon Transducers. PhD thesis. Royal Institute of Technology. Stockholm. 2000. 144 p.
4. Ebefors T., Kalvesten E., Stemme G. Dynamic Actuation of Polyimide V-grooves Joints by Electrical Heating. Sensors and Actuators A. 1998. V. 67. P. 199—204.
5. Тимошенко С. П., Жуков А. А., Захаров А. А. Биморфный балочный актюатор с V-образными полиимидными канавками // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 7. С. 60—64.
6. Horie M., Torii S., Kamiya D. Micro-hinges changed flexural rigidity intermittently for micromechanism joints // Microsystem Technologies. 2003. N 9. P. 381—385.
7. Yamada H., Suzuki K., Miura H., Takanobu H. Self-Assembly and Magnetic Actuation of Three Dimensional Micro Hinged Mechanisms // IEEE Transactions on Sensors and Micromachines. 2007. Vol. 127, N 4. P. 207—213.
8. Gel M., Shimoyama I. Parallel-plate electrostatic actuation with vertical hinges. J. Micromech. Microeng. 2001. Vol. 11. P. 555—560.
9. Бабаевский П. Г., Кулик С. Г. Трещиностойкость отвержденных полимерных композиций. М.: Химия, 1991. 334 с.

Д. С. Серегин, аспирант, МИРЭА,
e-mail: d_seregin@mirea.ru.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК ЦТС

Исследовано влияние температуры отжига на электрофизические свойства пленок ЦТС, сформированных методом химического осаждения из растворов. Образцы, кристаллизованные при температурах 600–700 °С, имеют характерные для сегнетоэлектриков петли гистерезиса и ВФХ, при этом с ростом температуры отжига наблюдается снижение остаточной поляризации, прямоугловности петель гистерезиса, уменьшение токов утечки и некоторое возрастание электрической прочности.

Ключевые слова: золь-гель, пленки, сегнетоэлектрик, кристаллизация, термообработка, гистерезис

Введение

Цирконат-титаната свинца (ЦТС) является основным материалом для использования в сегнетоэлектрических запоминающих устройствах (СЗУ) и МЭМС на основе сегнетоэлектриков [1]. Метод химического осаждения из растворов (золь-гель) широко используется в последние годы для формирования тонких слоев подобных многокомпонентных оксидов, обеспечивая сохранение стехиометрического соотношения элементов и относительно низкотемпературный режим кристаллизации оксидных фаз [2]. Золь-гель метод предполагает изначальное формирование аморфного слоя материала, кристаллизация которого осуществляется в ходе последующей температурной обработки. В связи с высокой скоростью диффузии отдельных компонентов пленки и слоев металлизации в ходе высокотемпературного отжига наблюдается формирование нежелательных фаз в нижележащих слоях гетероструктуры [3]. В этой связи, задачей отжига при формировании слоев ЦТС является достижение оптимальных кристаллической структуры пленки и ее электрофизических параметров при минимальной температуре термообработки.

В данной работе исследовано влияние температуры кристаллизации на электрофизические свойства сегнетоэлектрических пленок ЦТС, сформированных методом химического осаждения из растворов. Изучены петли сегнетоэлектрического гистерезиса, вольт-фарадные характеристики (ВФХ) и вольт-амперные характеристики (ВАХ) структур металл—сегнетоэлектрик—металл, кристаллизованных при температурах 550, 600, 650 и 700 °С.

Приготовление растворов

При получении пленкообразующего раствора в качестве исходных компонентов использовали моносольват изопропилата циркония $Zr(O^iPr)_4 \cdot PrOH$, тетраизопропоксид титана $Ti(O^iPr)_4$ и обезвоженный ацетат свинца $Pb(CH_3COO)_2$, синтезированный из оксида свинца с применением абсолютных реагентов: уксусного ангидрида и относительно небольшого количества уксусной кислоты, необходимого в качестве затравки [4]. Пленкообразующие растворы ЦТС готовились растворением компонентов в метилцеллозольве. Концентрация раствора в расчете на сумму алкоколятов титана и циркония составляла 0,25 моль/л.

Формирование пленок

Предварительно на кремниевых подложках (150 мм) был сформирован нижний платиновый электрод с адгезионным слоем оксида титана (10 нм), который осаждался на слой термического диоксида кремния (300 нм). Пленкообразующий раствор ЦТС осаждался методом послойного (5 слоев) центрифугирования (скорость вращения 3000 об/мин) с промежуточными сушкой при 180 °С и пиролизом при 400 °С. После осаждения пленки образцы со структурой ЦТС—Pt—TiO₂—SiO₂—Si в течение 20 мин подвергали кристаллизации при температурах 550, 600, 650 и 700 °С. Толщина сформированных пленок составляла ~164 нм. Верхний электрод 200 × 150 мкм осаждался через маску методом вакуумного распыления никеля.

Измерение петель гистерезиса

Измерения сегнетоэлектрического гистерезиса пленок ЦТС проводили методом Соьера—Тауэра [5]. На рис. 1 показаны усредненные петли гистерезиса каждого из образцов. Амплитуда испытательного синусоидального напряжения составляла ~6 В. Как видно из рисунка, образец, кристаллизация которого осуществлялась при $T = 550$ °С, характеризуется слабыми сегнетоэлектрическими свойствами, что, согласно данным просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), связано с неполным проращением зерен перовскита по толщине пленок и значительным содержанием фазы пироклора в виде частиц размером 10...15 нм [6].

Для оценки прямоугловности петли в качестве меры наклона удобно использовать значения или максимума дифференциальной диэлектрической проницаемости, или производной поляризации по напряжению в точке, в которой поляризация принимает значение, равное нулю [7].

В табл. 1 приведены основные параметры типичных петель гистерезиса каждого образца: P_r — остаточная поляризация; $E_{cr}^{(-)}$ и $E_{cr}^{(+)}$ — коэрцитивные напряженности электрического поля; $(dP/dU)|_{P=0}$ —

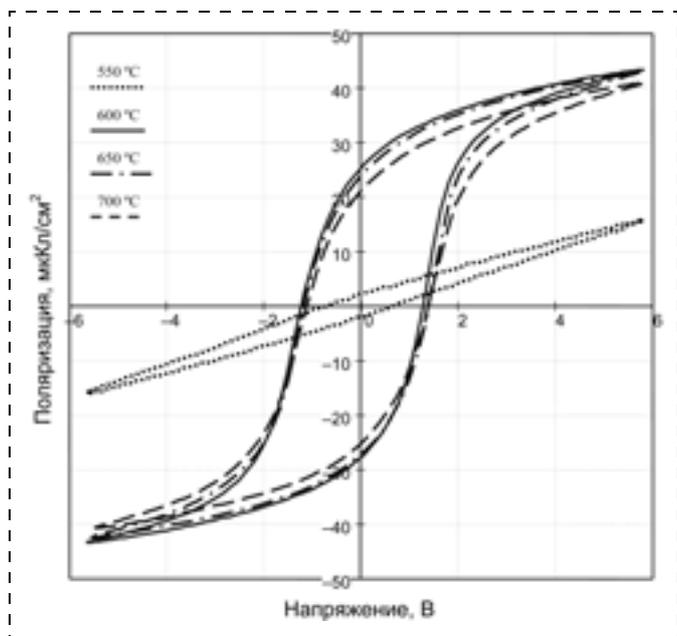


Рис. 1. Зависимости поляризации образцов пленок ЦТС от напряжения

крутизна, вычислявшаяся в точке пересечения ветвей петли гистерезиса с осью абсцисс; $\epsilon_{\text{диф max}}$ — значения дифференциальной диэлектрической проницаемости, соответствующие максимальной крутизне петли гистерезиса; $\epsilon_{\text{диф min}}$ — значения минимальной дифференциальной диэлектрической проницаемости, характеризующие степень насыщения переключаемой поляризации; $U_{\text{проб}}$ — напряжение электрического пробоя. В табл. 1 приведены также значения ширины петли гистерезиса, вычисленные в виде суммы модулей коэрцитивных напряжений ΣU_{cr} и $\Sigma U_{cr \epsilon}$. В первом случае — это сумма напряжений, при которых поляризация обращается в нуль, во втором случае — сумма напряжений, при которых крутизна петли максимальна. Как видно из представленных данных, во втором случае вычисленное значение ширины петли оказывается примерно на 10 % больше.

Параметры $U_{cm \epsilon}$ или $U_{cm P=0}$ характеризуют асимметрию (смещение) петли гистерезиса по отношению к переключающему напряжению. Напря-

жение смещения обычно связывают с зарядом, захваченным ловушками на границе раздела между металлическим электродом и сегнетоэлектриком. Вместе с тем, оно может появиться в результате выдерживания конденсатора в поляризованном состоянии в течение определенного времени (так называемый эффект запечатления, "imprint" [7, 8]). Возможной причиной внутреннего смещения в сегнетоэлектрических пленочных конденсаторах может также быть механическая связь между сегнетоэлектрическим материалом и электродами [7]. Встроенное напряжение смещения для сегнетоэлектрических материалов с достаточной точностью при хорошей прямоугольности петли может быть вычислено по формуле $U_{cm} \approx 0,5(U_{cr}^{(+)} + U_{cr}^{(-)})$.

Как видно из данных в табл. 1 вычисленные значения $U_{cm P=0}$ и $U_{cm \epsilon}$ отличаются не существенно, т. е. для вычисления встроенного напряжения смещения можно использовать значения коэрцитивных напряжений, соответствующих или равенству нулю поляризации или максимуму крутизны петли гистерезиса.

Из результатов, приведенных в табл. 1, можно сделать следующие основные выводы. При температуре кристаллизации 550 °C пленка ЦТС представляет собой структуру сэндвича, содержащую, помимо слоя сегнетоэлектрика, слой диэлектрика (пиролор) относительно большой толщины между верхним электродом и сегнетоэлектриком [6]. Наличие пассивного слоя приводит к существенному уменьшению крутизны петли, уменьшению остаточной поляризации и к определенному уменьшению напряженности коэрцитивного поля, что подтверждается данными работы [7].

При температуре кристаллизации 600 °C поляризация максимальна. При дальнейшем росте температуры кристаллизации наблюдается снижение остаточной поляризации и прямоугольности петель гистерезиса. И это уменьшение более существенно при увеличении температуры кристаллизации с 650 до 700 °C. Ширина петель практически не изменяется, т. е. коэрцитивные напряженности примерно одинаковы, но увеличивается асимметрия петель (возрастет напряжение смещения). Электрическая прочность пленок несколько возрастает (14...18 В) с рос-

Таблица 1

Основные характеристики петли гистерезиса пленочных ЦТС образцов с разной температурой кристаллизации

$T, ^\circ\text{C}$	$P_{r(\text{ср})}, \frac{\text{мкКл}}{\text{см}^2}$	$E_{cr}^{(-)}, \text{кВ/см}$	$E_{cr}^{(+)}, \text{кВ/см}$	$\frac{dP}{dU} _{P=0}, \frac{\text{мкКл}}{\text{см}^2 \cdot \text{В}}$	$\epsilon_{\text{диф max}}$	$\epsilon_{\text{диф min}}$	$\Sigma U_{cr}, \text{В}$	$U_{cm P=0}, \text{В}$	$\Sigma U_{cr \epsilon}, \text{В}$	$U_{cm \epsilon}, \text{В}$	$U_{\text{проб}}, \text{В}$
550	2,22	-58,0	52,5	2,64	510	350	1,81	-0,045	—	—	—
600	27,2	-74,7	79,2	45,0	8584	263	2,436	0,038	2,647	0,013	14,7
650	25,6	-73,5	87,4	42,2	7928	298	2,547	0,11	2,772	0,100	17,8
700	23,2	-69,3	85,9	33,7	6387	287	2,467	0,134	2,671	0,119	18,1

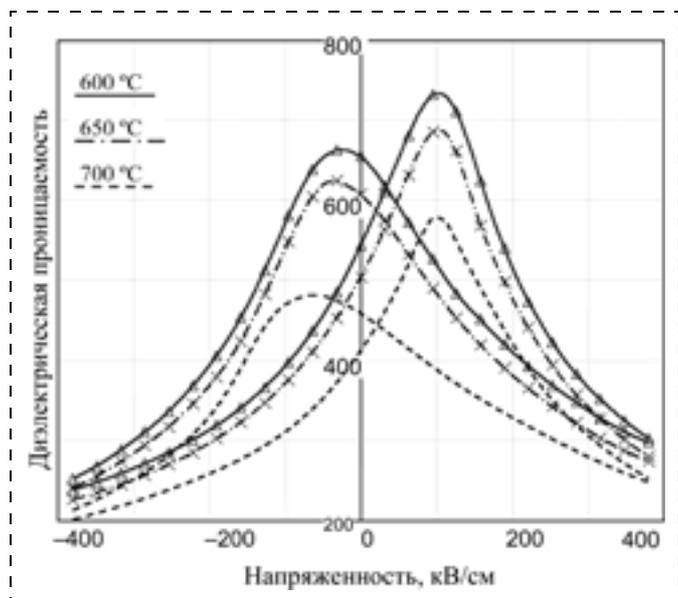


Рис. 2. Зависимости "малосигнальной" диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрических конденсаторов с различной температурой кристаллизации ЦТС пленки от напряжения

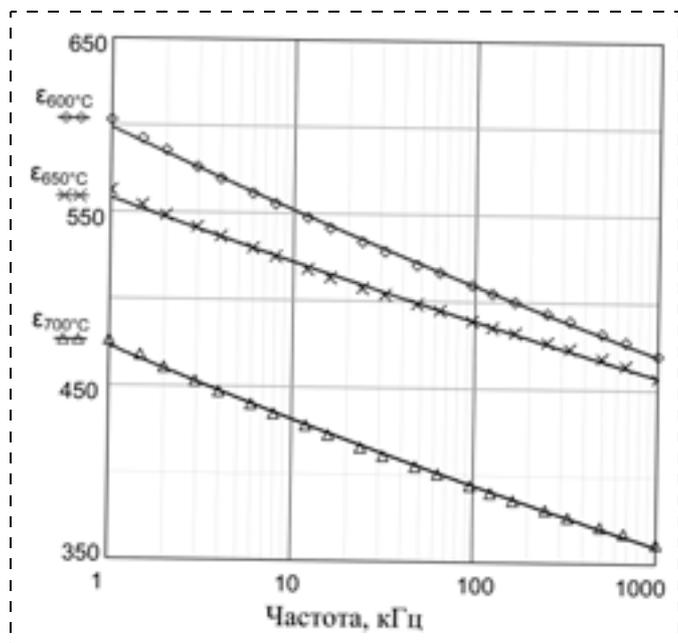


Рис. 3. Зависимости от частоты значений ДП (s) образцов ЦТС, соответствующих максимумам ВФХ

том температуры отжига. Наблюдаемые изменения связаны с усилением процессов диффузии титана вблизи границы раздела ЦТС—Pt с образованием включений рутила; эти процессы сопровождаются появлением составляющей (111) в текстуре перовскита [6].

Измерение вольт-фарадных характеристик

ВФХ были получены с помощью анализатора импеданса Agilent 4284A в диапазоне частот от 1 кГц до

1 МГц при амплитуде тестового сигнала 25 мВ. Типичные ВФХ, полученные на частоте 100 кГц, представлены на рис. 2 в виде зависимостей малосигнальной диэлектрической проницаемости (ДП), их форма не зависит от направления изменения напряжения смещения и от частоты испытательного напряжения [9]. Форма ВФХ сохраняется в диапазоне частот, но высота пиков с увеличением частоты измерения понижается. На рис. 3 показаны зависимости от частоты значений ДП, соответствующих максимумам ВФХ. Хорошее приближение этих зависимостей осуществляется степенной функцией $\varepsilon(f) = a \cdot f^b$. Коэффициенты функции для каждого образца приведены в табл. 2, там же даны значения среднего квадратического отклонения аппроксимации (СКО) и коэффициента корреляции r .

В табл. 3 приведены основные параметры измеренных ВФХ: значения ДП $\varepsilon_{\text{лин. макс}}$, соответствующие максимумам ветвей ВФХ при изменении управляющего напряжения в прямом "прям." и обратном "обр." направлениях; минимальное значение ДП $\varepsilon_{\text{лин. мин}}$, соответствующее напряжению смещения -6 В; коэффициент перекрытия по емкости k_C , равный отношению $\varepsilon_{\text{лин. макс}}/\varepsilon_{\text{лин. мин}}$; значения коэрцитивных напряжений и напряженностей электрического поля; значения встроенного напряжения смещения $U_{\text{см}}$.

Необходимо отметить, что среднее коэрцитивное напряжение образцов, кристаллизованных при температурах 600 и 650 °С, оцененное по ВФХ измерениям (рис. 3), составляет примерно 0,85 значения, определенного по петлям гистерезиса (см. рис. 2). Расхождение связано с различиями в динамике процессов переключения в данных методах.

Измерение вольт-амперных характеристик

Измерение ВАХ (в режиме переключенного вектора поляризации) осуществляли пикоамперметром НР 4140В. Измерения ВАХ выполняли по технологии, аналогичной применяемой при исследовании структур металл—диэлектрик—металл [10]. Измерения выполняли при комнатной температуре. В результате измерений установлено, что токи утечки образцов, кристаллизованных при температурах 650 и 700 °С при напряженности поля порядка коэрцитивного (100 кВ/см) составляют $\sim 0,1$ нА, в то время как для образца с температурой кристаллизации 600 °С —

Таблица 2

Коэффициенты степенной функции, аппроксимирующей частотные зависимости ДП

$T_{\text{кр}}, ^\circ\text{C}$	a	b	СКО	r
600	764,02	-0,0350	1,36	0,9992
650	681,77	-0,02899	1,44	0,9986
700	621,71	-0,03966	1,21	0,9993

Основные параметры ВФХ пленочных образцов ЦТС на частоте 100 кГц

$T_{кр}, ^\circ\text{C}$	$\epsilon_{\text{лин. макс}}$		$\epsilon_{\text{лин. мин}}$	k_C	$U_{cr}^{(-)}, \text{В}$	$U_{cr}^{(+)}, \text{В}$	$U_{см}, \text{В}$	$E_{cr}^{(-)}, \text{кВ/см}$	$E_{cr}^{(+)}, \text{кВ/см}$
	обр.	прям.							
550		60,5		1	—	—	—	—	—
600	733,6	663,2	237,7	3,09	0,403	1,657	0,627	25,1	102,9
650	687,4	623,7	226,0	3,04	0,563	1,672	0,555	34,95	103,9
700	578,4	481,5	201,4	2,87	0,989	1,626	0,313	61,4	100,3

на порядок больше. Вероятными причинами являются проводящие включения нанокристаллитов пироклора и меньший размер зерен, определяющий высокую долю границ раздела.

Заключение

Исследовано влияние температуры кристаллизации на электрофизические свойства тонких пленок ЦТС, сформированных методом химического осаждения из растворов.

Установлено, что температура кристаллизации 550 °С недостаточна для завершения процесса формирования перовскитной фазы: для образцов характерны высокие токи утечки и слабо выраженные петли диэлектрического гистерезиса. Образцы, кристаллизованные при температурах 600, 650 и 700 °С, имеют характерные для сегнетоэлектриков петли гистерезиса и ВФХ. С ростом температуры кристаллизации наблюдается снижение остаточной поляризации и прямоуглольности петель гистерезиса. При этом уменьшение более существенно при увеличении температуры кристаллизации с 650 до 700 °С. Этот факт предположительно связан с закреплением доменной структуры на границах раздела, обусловленной диффузией и окислением титана по границам зерен платины, что приводит к уменьшению переключаемой части заряда поляризации.

Напряженность коэрцитивных полей существенно не изменяется, однако асимметрия петель гистерезиса увеличивается (возрастает напряжение смещения). Форма ВФХ сохраняется в диапазоне частот 1...1000 кГц при снижении в степенной зависимости высоты пиков с увеличением частоты измерения.

Электрическая прочность пленок несколько возрастает с ростом температуры отжига (14...18 В).

С учетом того, что токи утечки пленки, прошедшей кристаллизацию при 600 °С, на порядок выше, чем пленок с температурами 650 и 700 °С, в качестве оптимальной для кристаллизации можно определить температуру 650 °С.

Работа выполнена при поддержке гранта аналитической ведомственной целевой программы "Развитие научного потенциала высшей школы (2009—2010 гг.)", подраздел: № 2.1.2.

Список литературы

1. Воротилов К. А., Сигов А. С. Сегнетоэлектрические запоминающие устройства: перспективные технологии и материалы // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 10. С. 30—42.
2. Vorotilov K. A., Yanovskaya M. I., Turevskaya E. P., Sigov A. S. Sol-gel derived ferroelectric thin films: avenues for control of microstructural and electric properties // J. Sol-Gel Science and Technology. 1999. V. 16. P. 109—118.
3. Zhigalina O. M., Burmistrova P. V., Vasilev A. L., Roddatis V. V., Sigov A. S., Vorotilov K. A. Microstructure of PZT capacitor structures // Ferroelectrics. 2003. V. 286. P. 311—320.
4. Воротилов К. А., Котова Н. М., Сигов А. С., Жигалина О. М. Влияние метода синтеза пленкообразующего раствора на свойства пленок цирконата-титаната свинца // Известия вузов. Физика. 2008. № 11/2. С. 87—92.
5. Барфут Дж., Тейлор Дж. Полярные диэлектрики и их применения: пер. с англ. / Под ред. Л. А. Шувалова. М.: Мир, 1970. 526 с.
6. Жигалина О. М., Хмеленин Д. Н., Серегин Д. С., Воротилов К. А., Сигов А. С. Влияние температуры отжига на структуру тонких пленок ЦТС // INTERMATIC — 2009. / Материалы Международной научно-технической конференции "Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения", 7—11 декабря 2009 г., Москва. М.: МИРЭА. 2009. Ч. 2. С. 7—11.
7. Tagantsev A. K., Gerra G. Interface-induced phenomena in polarization response of ferroelectric thin films // Appl. Phys. 2006. V. 100. P. 051607.
8. Ferroelectric Random Access Memories / Ed. H. Ishiwara, M. Okuyama, Y. Arimoto. — Berlin: Springer-Verlag. — Topics Appl. Phys. — 2004. — V. 93. — 283 p.
9. Pintilie L., Lisca M., Alexe M. Polarization reversal and capacitance-voltage characteristic of epitaxial Pb(Zr, Ti)O₃ layers // Appl. Phys. Lett. — 2005. — V. 86. — P. 1—3.
10. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2 кн. / Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 456 с.

В. П. Бокарёв, канд. хим. наук, нач. отдела,
e-mail: valbofrev@mail.ru,

Е. С. Горнев, д-р техн. наук, проф.,
зам. ген. директора,
ОАО "НИИ Элпа", г. Москва

ПРИМЕНЕНИЕ КОНТАКТНОЙ ЛИТОГРАФИИ В ПРОЦЕССАХ ПЕРЕНОСА СУБМИКРОМЕТРОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ МЭМС И ПАВ-УСТРОЙСТВ

Рассмотрены вопросы применимости контактной, проекционной и импринт литографии при изготовлении МЭМС и ПАВ-устройств с субмикрометровыми проектными нормами.

Ключевые слова: контактная литография, проекционная литография, иммерсионная литография, импринт литография, фоторезист, фотошаблон, субмикрометровые размеры, МЭМС, ПАВ-устройства

В настоящее время происходит переход технологии изготовления МЭМС к субмикрометровым проектным нормам. Одной из основных проблем при этом является технология переноса субмикрометрового изображения. Если при изготовлении интегральных схем (ИС) с субмикрометровыми размерами по мере уменьшения критического размера возрастали требования к фотолитографическому оборудованию и обеспечивался выпуск нового поколения фотолитографических установок, то вследствие сравнительно небольших объемов выпуска МЭМС соответствия применяемого технологического оборудования возрастающим требованиям к технологическим проектным нормам не наблюдается. Поэтому в настоящее время технология изготовления МЭМС, в том числе и технология изготовления устройств на поверхностных акустических волнах (ПАВ-устройств), базируется на использовании технологического оборудования, разработанного для изготовления ИС с проектными нормами уровня 0,7–1,0 мкм. Использование же современного фотолитографического оборудования, рассчитанного на выпуск изделий с проектными нормами 0,35 мкм и менее, лишается смысла из-за размера подложек, используемых при изготовлении МЭМС и ПАВ-устройств, так как современные литографические установки, предназначенные для изготовления сверхбольших интегральных схем (СБИС) рассчитаны на использование подложек диаметром от 200 мм и более. Диаметр же подложек, используемых при изготовлении МЭМС, как правило, не превышает 100 мм, а при изготовлении устройств на ПАВ, на основе которых изготавливаются наиболее чувствительные сенсорные устройства, например, такие как "Электронный нос", линейный размер подложек зачастую не превышает 25 мм. Такие размеры делают проблемным и практически невозможным применение

современных фотолитографических установок, обеспечивающих субмикрометровый и даже нанометровый уровень переноса изображения. И если с переходом на субмикрометровый уровень микроэлектроника отказалась от использования контактной печати для переноса изображения (что было оправдано как экономически, так и технически, поскольку избавляло от ряда серьезных проблем контактной литографии этого уровня), то технология МЭМС на сегодняшний момент в основном базируется на оборудовании для контактной печати.

Переход на субмикрометровый уровень резко ужесточил требования к обработке рабочей поверхности фотошаблонов и подложек, используемых при контактной печати. Также усложнилось изготовление фотошаблонов для контактной печати, а время их жизни (стойкость), которое и при микрометровых размерах не превышало 50 процессов переноса изображения, уменьшилось.

В отличие от контактной фотолитографии проекционная фотолитография использует для переноса субмикрометровых размеров шаблоны с микрометровыми минимальными размерами, что резко сокращает затраты на их изготовление и увеличивает качество воспроизведения заданного рисунка, так как изображение на фотошаблоне для проекционной печати в 4–10 раз больше передаваемого на рабочую пластину. Поэтому для передачи изображения уровня 0,5 мкм достаточно изготовить фотошаблон с минимальными размерами элементов 2 мкм и более. Это является важным фактором, так как упрощает изготовление фотошаблонов с заданными допусками на неровность края и линейность размеров. Последнее имеет определяющее значение при изготовлении устройств на ПАВ.

При изготовлении шаблонов для ПАВ-устройств возникают дополнительные требования. Дело в том, что частотно-селектирующие и частотно-задающие устройства на ПАВ должны обеспечивать работу в непрерывном частотном диапазоне. Центральная частота акустоэлектронного преобразователя f_0 определяется скоростью звука в пьезоэлектрическом кристалле подложки и частотой пространственного расположения электродов (шагом) встречно-штыревой структуры преобразователя (ВШП-структуры). Для ВШП с расщепленными электродами

$$f_0 = v_s/8d, \quad (1)$$

где d — ширина штыря, равная ширине зазора между штырями, а v_s — скорость звука в кристалле подложки.

Точность задания f_0 , как правило, определяется долями процента. Поэтому точность воспроизведения расположения штырей и промежутков между штырями, а также всего переносимого изображения должна быть не хуже 10^{-3} – 10^{-4} от заданного размера, т. е. не хуже 0,5 нм для ВШП с $d = 0,5$ мкм. Для справки, современный отечественный генератор изображения ЭМ-5389, рассчитанный на уровень проектных норм 0,2 мкм, имеет размер пикселя 120 нм и обеспечивает неровность края переносимого изображения на уровне 30 нм. Кстати, поэтому при субмикрометровых значениях ширины штырей и промежутков между штырями ВШП современная электронно-лучевая литография с дискретным пере-

мещением формируемого изображения реализовать такие допуски не может.

Сам же процесс фотолитографии, как правило, обеспечивает воспроизведение двумерного рисунка фотошаблона в фоторезисте с точностью не хуже $\pm 15\%$ от номинального размера его элементов и с 5% -ным допуском на требуемый наклон краев. При этом послойное совмещение приборных структур должно осуществляться с точностью не хуже $\pm 25\%$ от минимального размера элементов.

Несмотря на сравнительную простоту изготовления фотошаблонов с субмикрометровыми проектными нормами для проекционной литографии, контактная литография имеет свои преимущества перед проекционной печатью. При контактной фотолитографии [1–3] фотошаблон находится в прямом контакте с пластиной, на которой нанесен фоторезист. Поэтому при полном физическом контакте шаблона и подложки в тонких слоях фоторезиста можно получить разрешение уровня, определяемого минимальными размерами на шаблоне [2–3], тогда как разрешение установок проекционной печати ограничивается длиной волны источника излучения, используемого для экспонирования фоторезиста. Однако реальные поверхности рабочих пластин и шаблона не являются абсолютно плоскими, между ними существуют зазоры различной величины. При сопоставимости размеров переносимого изображения с длиной волны применяемого источника излучения наличие зазоров приводит к искажению размера и формы субмикрометровых элементов из-за расхождению краев области геометрической тени от фотомаски вследствие дифракционных эффектов. Поэтому недостаточная плоскостность рабочих поверхностей шаблона, пластины и слоя фоторезиста на пластине ограничивают минимальный переносимый размер. Кроме того, применение оптически прозрачных для данной длины волны подложек приводит к дополнительному проникновению излучения под маскирующую поверхность и также изменяет размеры переносимых элементов. Наличие же неорганических пылинок на пластине или шаблоне при контактной печати приводит не только к появлению локальных зазоров, но и к повреждению поверхности шаблона в момент его соприкосновения с пластиной. Поврежденные участки шаблона затем воспроизводятся на всех других пластинах, при экспонировании которых использован этот шаблон. И каждая следующая литография может добавлять свои собственные повреждения поверхности шаблона.

Следовательно, для обеспечения высокого выхода годных плотность дефектов (число дефектов в см^2) на рабочей пластине должна быть меньше 1 для каждого процесса литографического переноса изображения.

При отсутствии физического контакта между шаблоном и пластиной в локальных областях из-за неплоскостности либо наличия загрязнений перенос изображения осуществляется в дифракционной области Френеля [3], разрешение W в которой определяется формулой

$$W \approx \sqrt{0,7\lambda h}, \quad (2)$$

где λ — длина волны экспонирующего излучения, обычно равная 365 нм, а h — максимальная высота зазора между шаблоном и пластиной.

Рис. 1 иллюстрирует процесс прохождения ультрафиолетового излучения через субмикрометровые элементы фотомаски при наличии зазоров либо в случае проекционной фотолитографии. Из формулы (2) следует, что для получения разрешения на уровне 0,5 мкм по всей поверхности экспонируемой пластины локальные зазоры между рабочими поверхностями шаблона и пластины со слоем фоторезиста не должны превышать 1 мкм. Однако изготавливаемые рабочие пластины имеют прогиб поверхности до 20 мкм, который при вакуумном прижиме может полностью не устраниться, а уровень локальной неплоскостности рабочих пластин обычно составляет 0,5–1,0 мкм.

При наличии искажений геометрии исходного рисунка и отклонений контрольных размеров элементов, вызванных дифракционными эффектами, необходимо применять способы их подавления. Если для проекционной литографии способы подавления искажений давно разработаны и применяются, то их использование в контактной литографии затруднено из-за уменьшения размера корректирующих элементов на фотошаблоне в 4–10 раз по сравнению с шаблонами для проекционной печати.

Для уменьшения нежелательных искажений при контактной печати было предложено использовать так называемые гибкие фотошаблоны [4, 5], т. е. стеклянные шаблоны с толщиной стекла, не превышающей 0,2 мм. Было показано, что применение таких фотошаблонов позволяет гарантированно переносить изображение уровня 0,4 мкм. Однако изготовление и эксплуатация таких фотошаблонов крайне затруднены вследствие их пониженной стойкости к механическим воздействиям.

Разрешающую способность фотолитографии можно повысить введением в технологический процесс антиотражающих покрытий (ARC — *Anti Reflective Coating*), что имеет большое значение при пере-

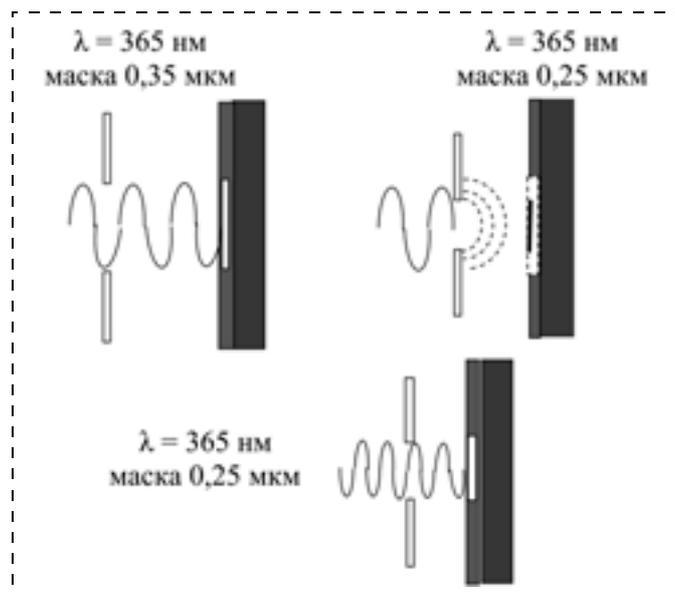


Рис. 1. Прохождение УФ излучения с разной длиной волны через субмикрометровые элементы маски с критическими размерами 0,35 и 0,25 мкм

носе субмикрометрового изображения на подложки с высоким коэффициентом отражения, а также при использовании прозрачных подложек. Так как отражение света от большинства поверхностей вызывает фазовый сдвиг волны на 180° , то на поверхности раздела фоторезист — подложка часто наблюдается минимум интенсивности излучения. В результате этого явления на подложке может оставаться тончайший слой слабо экспонированного фоторезиста, который не удаляется при проявлении. Для удаления этого слоя приходится прибегать к существенному переэкспонированию фоторезиста.

При использовании источника когерентного излучения интерференция падающей и отраженной волн приводит к появлению стоячих волн в слое фоторезиста. Наличие стоячих волн вызывает значительное изменение дозы экспонирования при изменении толщины пленки. Так, изменение толщины фоторезистивного слоя на 65 нм (четверть длины волны g -линии) может привести к 20 %-ному изменению дозы экспонирования для i -линии, а для ДУФ-фоторезистов (фоторезисты для дальнего ультрафиолета) этот эффект проявляется еще сильнее. Минимизировать данный эффект можно путем проведения постэкспозиционной сушки фоторезистивного слоя либо применением антиотражающих покрытий. Применение ARC желательнее и для проведения процессов обратной фотолитографии, так как промышленно выпускаемые антиотражающие покрытия являются хорошими адгезивными материалами, и их применение заменяет применение других промоторов адгезии. Кроме того, при проявлении такой двухслойной структуры, состоящей из ДУФ-фоторезиста и ARC-покрытия подложки, можно получить отрицательный профиль фотомаски, необходимый для успешного проведения процессов обратной фотолитографии.

Размеры переносимого субмикрометрового изображения можно уменьшить, применяя постэкспозиционную сушку при температуре, превышающей температуру стеклования фоторезистивной маски [6]. Данный метод позволяет получать изображение в фотомаске с линейными размерами менее 0,3 мкм. Однако такая обработка приводит к получению трапециевидного профиля элементов фотомаски, что неприемлемо для процессов обратной фотолитографии, находящей самое широкое применение при изготовлении металлизации МЭМС и ПАВ-устройств.

Как следует из формулы (2), наиболее простым способом улучшения разрешающей способности фотолитографических установок является уменьшение длины волны актиничного излучения. Именно по этому пути идет развитие оборудования для проекционной печати.

Применяемые источники УФ излучения на основе короткодуговых ртутно-ксеноновых ламп, например ДРКс-500, обеспечивают экспонирование фоторезиста на длинах волн до 225 нм включительно.

Однако при таких длинах волн возникает ряд проблем.

На рис. 2 (см. четвертую сторону обложки) сопоставлены спектры пропускания для высококчистого кварцевого стекла, оптического стекла и обычного оконного стекла, приведенные на сайте фирмы Heraeus Quarzglas GmbH & Co. KG.

Как видно из рисунка, только кварцевое стекло высокого качества пропускает ультрафиолетовое излучение в спектральном диапазоне менее 300 нм.

Поэтому применение в контактной фотолитографии кварцевой оптики и кварцевых фотошаблонов позволяет работать на длинах волн экспонирующего излучения до 200 нм. Это дает возможность ослабить допуски на локальные зазоры между рабочей пластиной и шаблоном без существенных искажений переносимой топологии.

Но при таких длинах волн необходимо переходить на другой тип позитивных фоторезистов, на так называемые ДУФ-фоторезисты, имеющие максимальную чувствительность при данных длинах волн и полимерную основу, пропускающую либо слабо поглощающую излучение дальнего ультрафиолета. Применение же обычных фоторезистов на новолачной полимерной основе становится нежелательным из-за активного поглощения излучения в спектральном диапазоне от 310 нм и менее крезол-формальдегидной новолачной полимерной основой фоторезиста и пониженной чувствительности к ДУФ-излучению фотоактивного компонента фоторезистов на базе сульфозефира ортоафтохинондиазида или диазокуинона. В табл. 1 представлены возможные варианты применения при производстве СБИС ДОЗУ фоторезистов для различных длин волн экспонирующего излучения.

Альтернативой позитивным фоторезистам на новолачной основе могут служить позитивные электронрезисты на основе полиметилметакрилата, однако время экспонирования этих фоторезистов ртутными источниками излучения может в десятки раз превышать аналогичный параметр фоторезистов на новолачной основе.

К наиболее простым методам увеличения разрешающей способности фотолитографического оборудования можно отнести иммерсионную литографию. Ее применение в технологии микроэлектроники позволило резко увеличить разрешающую способность сканеров для проекционной печати, работающих как на ртутных источниках с длиной волны 364 нм, так и на эксимерных лазерах с длиной волны 193 нм [7—8]. Сущность метода состоит в заполнении пространства между объективом установки и рабочей пластиной жидкостью с показателем преломления, существенно превышающим показатель преломления воздуха. Для еще большего эффекта объектив установки изготавливают из оптических материалов с высоким показателем преломле-

Таблица 1

Применимость источников УФ излучения в технологии ИС (на примере СБИС ДОЗУ)

Объем памяти	1 Мбайт	4—16 Мбайт	64 Мбайт	256 Мбайт	1 Гбайт
Источник излучения	Hg лампа g -line	Hg лампа i -line	Лазер KrF	Лазер ArF	Лазер F ₂
Длина волны λ , нм	436	365	248	193	157
Основа фоторезиста	Новолак	Новолак	Поливинилфенол	Акрилаты	Фторполимеры силосаны

Показатели преломления некоторых веществ

Вещество	Химическая формула	Показатель преломления n	λ , нм
Алмаз	C	2,419	589
Кремний	Si	4,01	589
Лютеций-алюминиевый гранат	$\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	1,87	589
Сапфир	Al_2O_3	1,92	193
Кварц	SiO_2	1,544	589
Оптическое стекло	Силикат K, Pb с добавками	1,47	589
Хлорид алюминия	AlCl_3	1,60	193
		1,44	364
Форфорная кислота	H_3PO_4	1,54	193
		1,45	364
Вода	H_2O	1,33	589
		1,44	193
Позитивные фоторезисты новолачные акриловые	Крезолформальдегид метакрилаты	1,55	589
		1,74	248
Бромкамфора	$\text{C}_9\text{H}_7\text{Br}_3$	1,598	589
Сероводород	H_2S	1,885	589

ния, например, из лютеций-алюминиевого граната или из сапфира. Так как скорость света, а значит, и длина волны излучения, распространяющегося в любой среде, зависят от показателя преломления среды, то заполнение пространства между объективом и фоторезистом средой с высоким показателем преломления уменьшает длину волны актиничного излучения в n раз, где n — показатель преломления иммерсионной среды. Сравнительно недавно фирмы Intel и TSMC заявили о намерении внедрить иммерсионную литографию для производства изделий с проектными нормами 45 нм. В дальнейшем они рассматривают возможность использования иммерсионных технологий для изготовления изделий с проектными нормами уровня 32 нм. Фирмы ASML, Canon и Nikon уже предлагают свои 193-нм иммерсионные сканеры для производства с 45-нм проектными нормами. Пример такого сканера приведен на рис. 3 (см. четвертую сторону обложки).

Основной проблемой иммерсионной литографии является подбор иммерсионной жидкости. Дело в том, что актиничное излучение с длиной волны 193 нм и менее сильно поглощается жидкими и твердыми средами, в том числе и иммерсионными жидкостями. Во многих случаях такое поглощение вызывает химические реакции в иммерсионных жидкостях с выделением газов, т. е. с появлением в иммерсионной жидкости пузырьков. Кроме того, жидкости с наибольшим показателем преломления, как правило, являющиеся химически агрессивными и токсичными. Многие из них взаимодействуют с металлическими конструкциями степперов, а также с оптикой, фоторезистом и с рабочей пластиной. Поэтому использование большинства высокопреломляющих жидкостей в иммерсионной литографии невозможно. Даже применение обыкновенной воды с $n = 1,44$ (при $\lambda = 193$ нм) столкнулось с проблемой газыделения при использовании 193-нм сканеров, поскольку излучение с такой длиной волны инициирует химические реакции во многих материалах. Проблема усугубляется при переходе на источники с еще более коротковолновым излучением. В табл. 2 приведены показатели преломления ряда веществ, часть которых применяется в иммерсионной литографии в качестве оптических материалов и иммерсионных жидкостей. Исследователями из Рочестерского технологического института было показано [9], что применение оптических материалов, фоторезисторов и иммерсионных жидкостей с показателями преломления более 1,93 при $\lambda = 193$ нм позволяет переносить критические размеры уровня 25 нм на 193-нм иммерсионном сканере.

В настоящее время за рубежом проводятся активные поиски и разработки иммерсионных жидкостей для длин волн 193 нм и менее. Поэтому вполне возможно, что в ближайшем десятилетии технологические задачи микроэлектроники в области переноса изображения уровня до 25 нм будут решены с использованием Ar—F либо F_2 иммерсионных сканеров без привлечения EUV-литографии (на источниках экстремального ультрафиолетового излучения).

В последнее время наметилось еще одно направление в использовании модернизированных установок для контактной печати в процессах переноса субмикрометрового и даже нанометрового изображения. Этот тип литографического процесса получил название импринт-литографии [9]. В отличие от контактной и проекционной печати в данном процессе шаблон применяется в качестве своеобразного штампа, с помощью которого изображение в маскирующем слое создается путем оттиска этого штампа с последующей полимеризацией полученного рисунка ультрафиолетовым излучением при комнатной температуре в установках УФ наноимпринтной литографии или полимеризацией при нагреве в установках термоконтактной печати. Пример таких установок приведен на рис. 4 (см. четвертую сторону обложки).

В установках используются два вида шаблонов для импринт-литографии — это жесткие и мягкие штампы. Жесткий штамп изготавливается из кварцевого стекла, на рабочей поверхности которого методами электронной литографии и анизотропного плазмохимического травления формируется необходимый рисунок с субмикрометровым либо нанометровыми размерами. Мягкий штамп изготавливают полимеризацией под воздействием ультрафиолетового излучения рисунка, сформированного жестким штампом в полидиметилсилоксане (ПДМС). Во всех случаях оборудование изготавливается на базе модернизированных установок для контактной печати. Преимущество мягких штампов перед жесткими состоит в их способности принимать форму поверхности рабочей пластины, компенсируя все ее неровности на поверхности диаметром 200 мм и более, в то время как для жестких штампов рабочая поверхность в настоящее время не превышает 25×25 мм. Кроме того, мягкие штампы являются зеркальными копиями жестких, и стоимость их изготовления не превышает 30 долл. даже для штампов с нанометровыми критическими размерами. В настоящее время наноимпринтная литография применяется при пере-

носе размеров от 200 нм и более, хотя позволяет переносить размеры до 50 нм и менее. Основным отличием установок для импринт-литографии от установок для контактной печати является наличие дополнительного устройства для прецизионного, с регулируемым усилием и нагревом, прижима штампа к рабочей пластине. А дополнительные требования к используемому в процессах импринт-литографии фоторезистам состоят в отсутствии их взаимодействия с ПМДС при использовании мягких штампов. Уменьшение адгезии материала фоторезиста к штампам обеспечивается применением смачивающих штамп химически инертных органических материалов с низкими значениями поверхностной энергии.

Таким образом, в современной технологии переноса субмикрометровых изображений при изготовлении МЭМС и ПАВ-устройств возможно использовать как установки для контактной печати, так и установки проекционной печати. Ограничением для контактной литографии является наличие в технологии операций совмещения слоев с субмикрометровыми проектными нормами. Однако для большинства изделий на ПАВ и МЭМС такие технологические операции при изготовлении изделий отсутствуют. Поэтому экономическая оправданность использования того либо иного вида оборудования зависят от стоимости и производительности самого оборудования и систем поддержания его работоспособности, а также от стоимости и времени жизни фотошаблонов. С появлением установок для наноимпринтной литографии в большинстве случаев становится экономически выгодным применение данного вида оборудования, на один-два порядка более дешевого по сравнению с установками для проекци-

онной печати, рассчитанными на перенос изображения с аналогичными топологическими нормами.

По-видимому, контактная литография при ее модернизации под иммерсионные и импринт-процессы в комплекте с прецизионно изготовленными шаблонами может быть использована при производстве изделий на ПАВ и МЭМС устройств с проектными нормами 0,1 мкм и менее.

Список литературы

1. Березин Г. К., Никитин А. В., Сурис Р. А. Оптические основы контактной фотолитографии. М.: Радио и связь, 1982. 104 с.
2. Валиев К. А., Великов Л. В., Вернер В. Д., Раков А. В. Субмикронная контактная литография с трафаретными шаблонами // Электронная промышленность. 1983. № 1. С. 36–38.
3. Моро У. Микролитография. Принципы, методы, материалы. В 2-х частях. Ч. 2. М.: Мир, 1990. 632 с.
4. Smith H. I., Bachner F. J., Efremov N. A high yield photolithographic technique for surface wave devices // J. Electrochem. Soc. 1971. V. 118, N 5. P. 821–825.
5. Smith H. I., Efremov N., Kelly P. L. Photolithographic contact printing of 4000 Å linewidth patterns // J. Electrochem. Soc. 1974. V. 121, N 11. P. 1503–1506.
6. Фролов В. М. Высокотемпературная обработка фоторезиста после экспозиции // Электронная промышленность. 1990. № 11. С. 68–70.
7. Marge M., Bruynooghe S., Clube F., Nabari A., Saussol J. L., Grass E., Mayer M., Schnabel B., Kley E. B. 120 nm lithography using off-axis TIR holography and 364 nm exposure wavelengths // Microelectronic Engineering. 2001. V. 57. P. 59–63.
8. Smith B. W., Fan Y., Slocum M., Zavyalova L. 25 nm Immersion Lithography at a 193 nm Wavelength // SPIE 2005. N 57547. P. 7.
9. Chou S. Y., Krauss P. R. Imprint lithography with 25 Nanometer Resolution // Science. 1996. V. 272. N 5258. P. 85–87.

УДК 53.044

М. С. Афанасьев, канд. тех. наук, ст. науч. сотр., e-mail: michaela2005@yandex.ru,

А. Ю. Митягин, д-р физ.-мат. наук, проф., гл. науч. сотр., зав. тем. группой,

Г. В. Чучева, д-р физ.-мат. наук, зав. лаб., Институт радиотехники и электроники (Фрязинский филиал) РАН,

С. А. Косарев, студент,

И. Ю. Колодяжный, студент, Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет)

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АККУМУЛЯТОРОВ ВОДОРОДА НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНОК, ЛЕГИРОВАННЫХ ФТОРОМ

Проведены теоретические и экспериментальные исследования технологии изготовления твердотельных сорбентов на основе пленок фторуглеродных соединений для создания с их использованием эффективных аккумуляторов водорода.

Ключевые слова: CVD-метод, фторуглеродная пленка, аккумулятор водорода

Введение

Разработка новых более эффективных методов накопления и хранения водорода является в настоящее время одной из актуальных научно-технических задач, успешное решение которой во многом определит дальнейшее развитие "водородной" энергетики [1].

В настоящее время разработаны и находят применение различные накопители водорода и способы его хранения: в жидкой фазе при криогенных температурах, в баллонах либо в твердотельных сорбентах при нормальных условиях [2]. Методы хранения и транспортировки водорода в жидкой фазе и баллонах характеризуются высокой стоимостью и большой массой тары для длительного хранения [3].

Сравнение твердотельных сорбентов показывает, что общим недостатком металлгидридов является снижение их сорбирующей способности при многократных циклах сорбции—десорбции вследствие низ-

кой химической устойчивости и высокой стоимости изготовления металлгидридов.

Опубликованные данные по сорбционной емкости углеродных наноматериалов различаются иногда в 8–10 раз. Причиной этого является отсутствие надежных способов получения "чистых" углеродных нанотрубок, графитовых нановолокон с заданными структурными характеристиками. Следует подчеркнуть, что сорбенты на основе металлгидридов, активированных углей, углеродных наноматериалов изготавливают в виде гранул, порошков, что затрудняет регулируемый процесс десорбции водорода из объема сорбента.

Экспериментальные результаты

В ряду твердотельных сорбентов водорода практически интерес представляют химически устойчивые фторуглеродные соединения, изготовленные в виде пленок, позволяющие увеличить энергоемкость сорбента, снизить стоимость его изготовления и повысить эксплуатационные характеристики аккумуляторов водорода.

Целью работы являются экспериментальные исследования технологии изготовления твердотельных сорбентов на основе пленок фторуглеродных соединений и создания с их использованием эффективных накопителей водорода. В статье представлены исследования по созданию методом Chemical Vapor Deposition (CVD) из газовой фазы тонкопленочных углеродных материалов. Тонкопленочный углеродный материал получали путем контролируемой диссоциации в СВЧ плазме органических CH_4 и фторуглеродных соединений CH_3F . Пленки осаждали на полимерные подложки из лавсана при дефиците H_2 и низких температурах подложки для увеличения степени графитизации пленок. На рис. 1 представлена схема конструкции установки формирования фторуглеродных пленок CVD-методом с электронно-циклотронным резонансным (ЭЦР) разрядом.

Установка состоит из реакционной камеры, вакуумной системы откачки, газовой системы подачи реакционной смеси, магнетрона, соленоида, циркулятора. Реакционная камера представляет собой цилиндр, внутри которого установлен нагреваемый подложкодержатель, передвигаемый вдоль реакционной камеры. Темпера-

тура подложки контролируется с точностью $\pm 3^\circ\text{C}$. Вакуумная система состоит из последовательно включенных форвакуумного и диффузионного насосов и позволяет создавать остаточное давление в реакционной камере не хуже $5 \cdot 10^{-5}$ мбар ($5 \cdot 10^{-3}$ Па). Контроль остаточного давления в камере осуществляется вакуумметром ВИТ-3. Система подачи реакционной смеси представляет собой два вентиля, соединенных параллельно, которые имеют общий выход в реакционную камеру, что позволяет одновременно работать с несколькими видами рабочих сред. В качестве источника излучения используется маг-

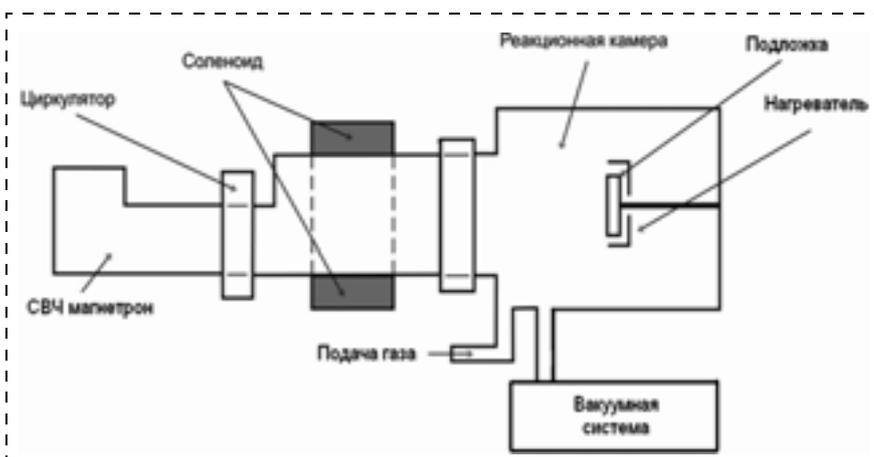


Рис. 1. Схема конструкции установки формирования фторуглеродных пленок CVD-методом с ЭЦР-разрядом

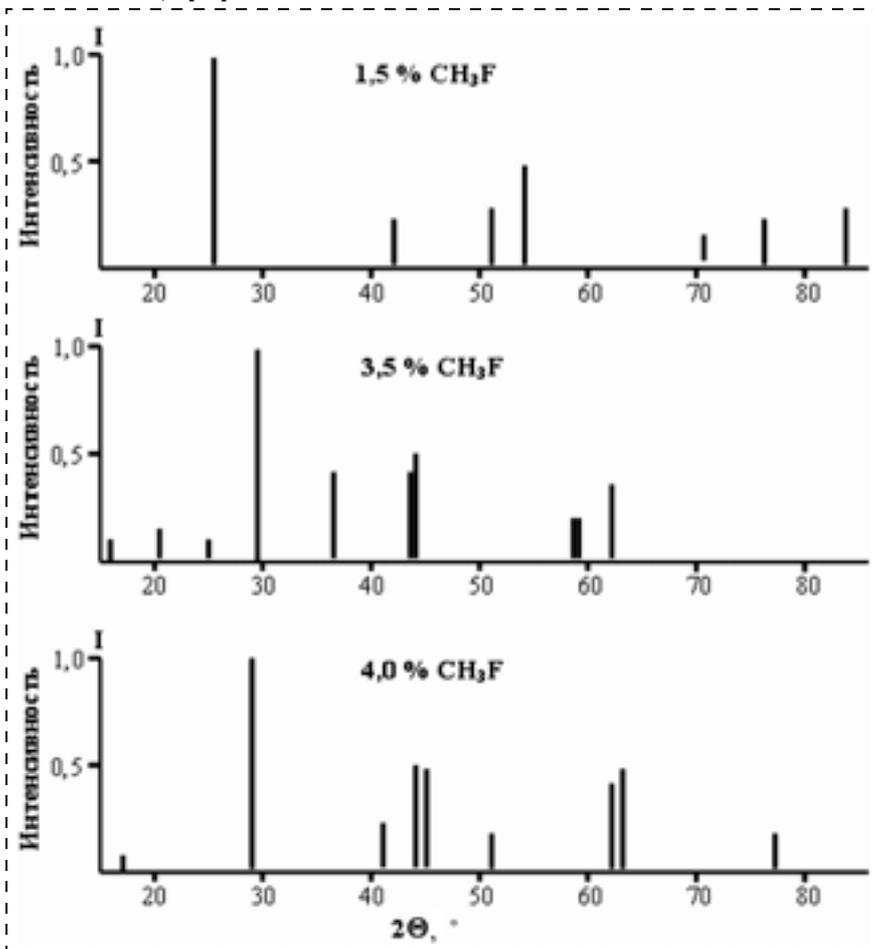


Рис. 2. Штрих-диаграммы пленок

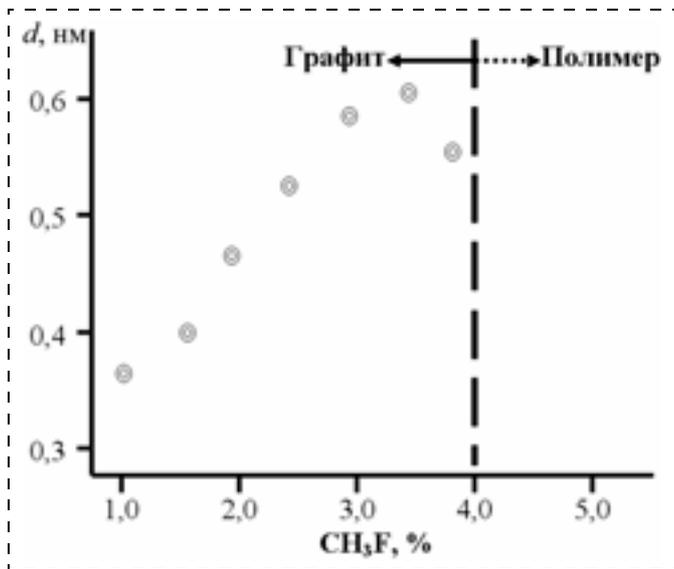


Рис. 3. Зависимость изменения межплоскостных расстояний графита от концентрации CH₃F в H₂ + CH₄

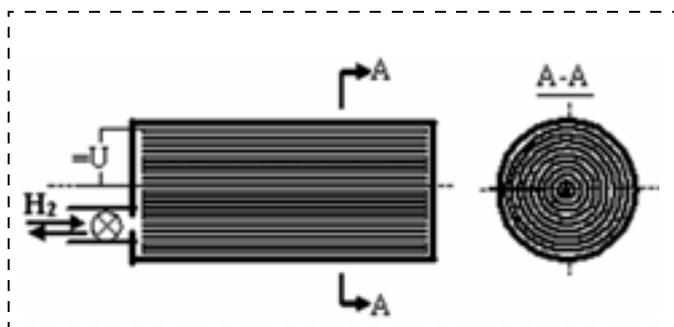


Рис. 4. Схема конструкции аккумулятора водорода

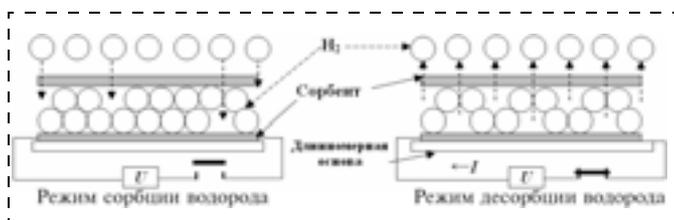


Рис. 5. Иллюстрация принципа работы сорбента в режимах сорбции и десорбции

нетрон М-105 с частотой 2,45 ГГц, максимальной мощностью 300 Вт с блоком управления и циркулятор. Циркулятор предназначен для гашения отраженной волны и предотвращения попадания отраженной мощности в магнетрон. На расстоянии 80 мм от диэлектрического окна в реакционной камере находится зона газового разряда. Для стабилизации газового разряда используется соленоид с магнитным полем 2,5 Тл.

Методика напыления заключалась в следующем. Перед началом процесса осаждения фторуглеродных пленок реакционная камера откачивалась до остаточного давления $7 \cdot 10^{-5}$ мбар ($7 \cdot 10^{-3}$ Па). Во время откачки подложка разогревалась до заданной

температуры. Температура подложки контролировалась закрепленной на ней термопарой. Далее зажали газовый разряд и проводили процесс напыления в течение 60...120 мин в зависимости от требуемой толщины пленки. Формирование пленок осуществлялось при следующих технологических режимах: количество CH₃F в H₂ + CH₄ – 1,5...5,0 %; температура подложки не более 200 °С; остаточное давление $5 \cdot 10^{-3}$ мбар (0,5 Па); мощность магнетрона 250 ± 10 Вт.

При данных режимах напыления нами были сформированы пленки с параметрами: толщина пленок не более 15,0 мкм; плотность 2,2...2,3 г/см³; удельное сопротивление 10^{-1} Ом · см. В полученных пленках на установке ДРОН-5 был проведен рентгенофазовый анализ. На рис. 2 представлены штрих-диаграммы пленок при различных концентрациях CH₃F, где по оси абсцисс отложено угловое положение счетчика (20°), необходимое для регистрации угла отражения от образца.

Показано, что при концентрации CH₃F менее 4,0 % формируются пленки со структурой графита. Из результатов рентгенофазового анализа нами построена зависимость изменения межплоскостных расстояний графита от концентрации CH₃F в H₂ + CH₄ (рис. 3).

Обнаружено, что при концентрации CH₃F от 1,0 до 4,0 % межплоскостное расстояние в пленках составляет от 0,39 до 0,6 нм, а при концентрации CH₃F выше 4,0 % формируются полимерные пленки. На основании проведенных измерений установлено, что нами выращены на лавсановых подложках пленки графита, легированные фтором, в которых межплоскостные расстояния составляли около 0,6 нм.

Исходя из полученных результатов предлагается конструкция аккумулятора водорода, выполненного на основе длиномерных фторуглеродных пленочных сорбентов. На рис. 4 представлена схема конструкции аккумулятора водорода, а на рис. 5 иллюстрируется принцип работы сорбента в режимах сорбции и десорбции.

Тонкопленочные сорбенты на основе углерода позволяют в реальном масштабе времени извлекать с высокой скоростью контролируемые объемы водорода за счет быстрого нагрева токопроводящего сорбента, пропуская через него электрический ток (I).

Ниже представлены расчетные параметры разрабатываемого аккумулятора водорода на основе фторуглеродных пленок.

Энергоемкость

Количество водорода в сорбенте, % $\geq 10,0$
 Объемное содержание водорода, кг/м³ $\geq 110,0$

Условия эксплуатации

Температура, °С $-60...+60$
 Давление, Па $\geq 10^3$
 Скорость извлечения водорода, м³/с (л/с) $\geq 0,15$ (150,0)
 Максимальная температура сорбции, °С $55,0 \pm 5,0$
 Температура десорбции, °С $+60,0...+105,0$

Заключение

На основании проведенных экспериментов и теоретических расчетов установлено, что создание твердотельных сорбентов на основе наноразмерных пленок фторуглеродных соединений позволит:

- увеличить в 2...3 раза энергоемкость, т. е. содержание водорода в сорбенте;
- снизить в 5...6 раз стоимость изготовления сорбентов;
- снизить на 1...2 порядка массогабаритные характеристики накопителей водорода за счет отсутствия герметизации сорбента;

- повысить эксплуатационные характеристики и увеличить на порядок срок эксплуатации накопителей водорода.

Список литературы

1. Шейндлин А. Е. Проблемы новой энергетики. М.: Наука, 2006.
2. Алексеева О. К. и др. Системы хранения водорода // Водородная энергетика будущего. 2009. № 4 (10) июнь. С. 38–44.
3. Yang C. Defining low-cost hydrogen pathway strategies to meet an evolving hydrogen demand // Proc. of the 15th Annual U/S/ 26–29, April 2000.

УДК 621.791.3

В. Н. Штенников, канд. техн. наук, зам. нач. упр., ФГУП УЭМЗ, Екатеринбург, shtennikov@uemz.ru

МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕБУЕМОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ КОНТАКТНОЙ ПАЙКИ

Качество паяных соединений электронных компонентов в первую очередь зависит от температуры пайки.

Стандартные режимы монтажа не гарантируют получение качественных паяных соединений уникальной конструкции.

Автором статьи разработана и апробирована методика обеспечения требуемой температуры контактной пайки для соединений нетипичной конструкции.

Ключевые слова: прибор, сборка, микроэлектроника, температура пайки, качество

В связи с тем, что табло паяльной станции отображает температуру паяльного стержня в зоне терморегулятора, а не на паяющем конце, ее значение, как правило, контролируется дополнительно. Тем не менее упомянутый подход не гарантирует соблюдения требований нормативной документации в части требуемой температуры пайки, потому что она зависит как от температуры холостого хода паяльного стержня, так и от ряда других параметров паяльного инструмента и паяных соединений [2].

Обычно температура холостого хода стержня паяльного инструмента на 20...40 °С выше, чем требуемая температура пайки, чтобы компенсировать отвод теплоты в паяное соединение. Этого бывает достаточно для выполнения типовых паяных соединений. Теплопоглощение оригинальных электромонтажных соединений на печатной плате может существенно отличаться от среднего, поэтому обеспечить их качественную пайку при использовании стандартных режимов пайки не всегда возможно. В таком случае приходится проводить специальные лабораторные испытания по определению температуры пайки. По некоторым литературным данным

снижение температуры холостого хода стержня паяльника может достигать 110 °С [3].

Авторы ряда источников ограничиваются самыми общими рекомендациями и предлагают для каждого из электромонтажных соединений на печатной плате методом подбора определять оптимальную температуру холостого хода паяльного стержня, а также тип паяльного инструмента [4]. Предлагаемые методы, во-первых, чрезвычайно трудоемки, а во-вторых, недостаточно объективны в части подбора паяльного инструмента.

Суть опубликованных методик заключается в следующем. Ориентировочно подбирают диаметр паяльного стержня с учетом доступа к паяному соединению. На расстоянии 1...5 мм от паяющего конца стержня помещают измерительный спай термопары, свободные концы которой подключают к самопишущему потенциометру. Тип (мощность, теплоемкость) паяльника подбирают, многократно повторяя пайку данного паяного соединения, пока не получают требуемую температуру паяющего конца стержня во время пайки, которую принимают за температуру пайки [3, 4].

Перечисленные методики имеют следующие основные недостатки.

Во-первых, испытания предполагают большое число измерений, включая перебор всех имеющихся инструментов пайки.

Во-вторых, не обоснованы попытки подобрать оптимальный тип паяльного инструмента по описанной методике, так как снижение исходной температуры паяльного стержня во время одиночной пайки не зависит от типа паяльника и его мощности, а зависит от диаметра, материала и, при определенных условиях, от длины паяльного стержня [5]. Более того, увеличение мощности паяльного инструмента с одновременным уменьшением диаметра паяльного стержня приведет к еще большему снижению температуры его рабочего (паяющего) конца [6].

В-третьих, не учитывается зависимость показаний прибора измерения температуры от расстояния измерительной термопары до паяющего конца стержня, длины паяльного стержня [2].

Проведенные автором исследования позволили выявить перечисленные недостатки и значительно усовершенствовать методику.

Рассмотрим наиболее простой с позиции теплообмена случай — пайку и лужение проводов. Тогда будут справедливы следующие соотношения [5]:

$$\Delta t_1 = t_{п1} \frac{S_2 \sqrt{(\lambda \rho c)_2}}{S_1 \sqrt{(\lambda \rho c)_1}}; \quad (1)$$

$$\Delta t_{1(x, \tau)} = \Delta t_1 \left\{ 1 - \Phi \left(\frac{x}{2 \sqrt{a_1 \tau_{п}}} \right) \right\}, \quad (2)$$

где c — удельная теплоемкость материала паяльного стержня или провода, Дж · кг⁻¹ · °С⁻¹; ρ — плотность материала паяльного стержня или провода, кг · м⁻³; λ — коэффициент теплопроводности материала паяльного стержня или провода, Вт · м⁻¹ · °С⁻¹; $a = \frac{\lambda}{\rho c}$ — коэффициент температуропроводности материала паяльного стержня, м² · с⁻¹; S_1 — площадь поперечного сечения паяльного инструмента, м²; $\Delta t_1 = t_{xx} - t_{п1}$ — снижение температуры паяющего конца бесконечно длинного стержня при одиночной пайке, °С; t_{xx} — избыточная температура установившегося режима (холостого хода) паяльного инструмента, при котором пайка не производится, а количество теплоты, выделяемой обмоткой нагревателя, и теплоты, рассеянной в атмосферу, равны, °С; $t_{п1}$ — избыточная температура рабочего (паяющего) конца стержня во время одиночной пайки, °С; $\tau_{п}$ — время пайки, с;

$\Phi(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-\xi^2} d\xi$ — интеграл вероятности, где

$$u = \frac{x}{\sqrt{a_1 \tau_{п}}}.$$

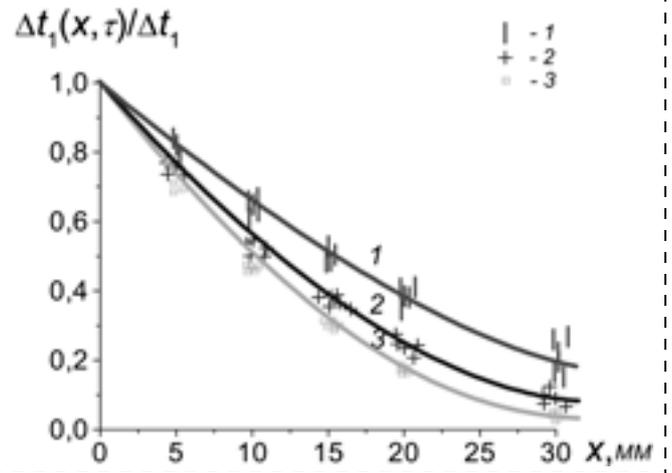
В случае пайки или лужения нескольких проводов одновременно S_2 — суммарная площадь их поперечного сечения.

На рисунке показано снижение температуры медного паяльного стержня во время пайки на различном расстоянии от паяющего конца. Кривые — теоретические значения, значки 1, 2, 3 — экспериментальные данные.

Полученные уравнения можно использовать непосредственно для расчета температуры пайки или лужения проводов. При отработке режимов монтажа паяных соединений произвольной конфигурации, например на печатном узле, полезно воспользоваться дополнительными соотношениями, приведенными ниже.

При этом необходимо соблюдать следующие условия.

Предварительный диаметр паяльного стержня необходимо выбирать с учетом доступа к паяному соединению. Снижение температуры паяющего конца медного стержня во время пайки с погрешностью не более 5 % не зависит от его длины, если термостабилизатор паяльного инструмента находится не ближе 2,5 см от паяющего конца стержня, а время пайки не более 2,5 с [7].



Снижение температуры медного паяльного стержня во время пайки на различном расстоянии от паяющего конца: 1 — время пайки 2,7 с; 2 — время пайки 1,4 с; 3 — время пайки 1,0 с

Измерительный спай термопары необходимо закреплять на расстоянии 0,5 мм от паяющего конца медного стержня, что обеспечит проведение измерений с погрешностью не более ±2 % по Δt_1 при времени пайки 2 с.

Измерение температуры паяльного стержня до и во время пайки следует проводить с помощью термопары с диаметром электродов 0,06...0,2 мм. При этом диаметр паяльного стержня должен быть много больше, чем диаметр проводов термопары, как правило, в 5 раз и более. Холодные концы термопары необходимо подключать к самопишущему потенциометру, например КСП-4 (пределы измерений 0...50 мВ, класс точности 0,25).

Требуемую температуру холостого хода паяльного стержня, обеспечивающую оптимальную температуру пайки, определяют по формулам, вытекающим из соотношения (1):

$$t_{xx}^1 = t_{xx} \frac{t_{п1}^1}{t_{п1}}; \quad (3)$$

$$\Delta t_1^1 = \Delta t_1 \frac{t_{п1}^1}{t_{п1}}; \quad (4)$$

$$\Delta t_1^1 = \Delta t_1 \frac{1}{\left(\frac{d_1^1}{d_1}\right)^2 \left(1 - \frac{\Delta t_1}{t_{xx}}\right) + \frac{\Delta t_1}{t_{xx}}}, \quad (5)$$

где d_1 — диаметр паяльного стержня; верхний индекс 1 означает новое значение по отношению к предыдущему (без индекса).

При $\Delta t_1 \ll t_{xx}$ получим

$$\Delta t_1^1 \approx \Delta t_1 \left(\frac{d_1^1}{d_1}\right)^2. \quad (6)$$

Пример 1. $t_{ф.хх} = 280$ °С, $t_{ф.п1} = 210$ °С, где индекс "ф" обозначает температуру с учетом температуры воздуха.

Избыточные температуры составят: 260 и 190 °С, соответственно. Необходимо определить температу-

ру $t_{\text{ф.хх}}^1$ для припоя ПОС61, обеспечивающую качественные паяные соединения.

Температура пайки для припоя ПОС61 согласно действующей нормативной документации должна быть не менее 230 °С (избыточная — не менее 210 °С).

Следовательно, обеспечить требуемую избыточную температуру пайки $t_{\text{п1}}^1 \geq 210$ °С, не меняя диаметра стержня, можно при минимальной температуре холостого хода $t_{\text{ф.хх}}^1 \geq \left(260 \cdot \frac{210}{190} + 20\right) \geq 307$ °С.

Пример 2. $t_{\text{ф.хх}} = 280$ °С, $t_{\text{фп1}} = 210$ °С, $d_1 = 3$ мм. Необходимо определить возможность обеспечения оптимальной температуры пайки припоем ПОС61 при неизменной температуре $t_{\text{ф.хх}} = 280$ °С путем использования паяльного стержня большего диаметра.

В этом случае $\Delta t_1 = 70$ °С. Применяя новый паяльный стержень диаметром 4 мм, мы обеспечим температуру пайки $t_{\text{п1}}^1 \approx 240$ °С, что удовлетворяет требованиям нормативно-технической документации по пайке припоем ПОС61: 230...265 °С.

После расчета режимов пайки необходимо провести контрольные измерения.

Описанный метод определения режимов и инструмента для монтажа блоков автоматики успешно опробован на различных изделиях предприятия.

Выводы

1. На базе теоретических и экспериментальных исследований разработана и апробирована методика

обеспечения требуемой температуры контактной пайки.

2. Разработанная методика исключает проведение большого числа измерений. При отработке режимов монтажа печатных плат требуется провести одну серию замеров вместо длительного подбора паяльного инструмента, паяльных стержней, рабочих температур.

3. Отработанная методика позволяет исключить возможные ошибки, связанные с неконтролируемым размещением измерительной термопары.

Список литературы

1. Штенников В. Н. Оценка времени и температуры пайки электронных приборов // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 5. С. 15—17.
2. Штенников В. Н. Материал для жал паяльных станций // Компоненты и технологии. 2004. № 7. С. 200—201.
3. Максимихин Б. А. Технологические процессы пайки электромонтажных соединений. Л.: Энергия. Ленинград. отд., 1980. 44 с.
4. Хряпин В. Е. Справочник паяльщика. Изд. 5-е. М.: Машиностроение, 1981. 350 с.
5. Штенников В. Н., Байдаков В. Г. Наука и производство. Повышение качества приборов автоматики // Компоненты и технологии. 2004. № 6. С. 192—194.
6. Штенников В. Н., Байдаков В. Г. Повышение надежности приборов и производительности оборудования для контактной пайки // Компоненты и технологии. 2004. № 7. С. 192—193.
7. Штенников В. Н. Опыт предприятия по изучению охлаждения паяльных стержней при пайке // Компоненты и технологии. 2005. № 4. С. 196—199.

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

УДК 621.315.959

А. В. Войцеховский¹, д-р физ.-мат. наук, проф.,

А. П., Коханенко¹, д-р физ.-мат. наук,
ст. научн. сотр.,

А. Г. Коротаев¹, канд. физ.-мат. наук,
ст. научн. сотр.,

Д. В. Григорьев¹, канд. физ.-мат. наук, доц.,

Н. А. Кульчицкий², д-р техн. наук, проф.,

А. А. Мельников², д-р физ.-мат. наук, проф.,

¹ Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Томский государственный университет", e-mail: vav@elefot.tsu.ru

² Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (Технический университет, г. Москва), e-mail: a.melnikov@mirega.ru

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИБОРОВ С НАКОПЛЕНИЕМ ЗАРЯДА

Проведен обзор имеющихся данных по радиационной стойкости приборов с накоплением заряда. Рассмотрено влияние облучения γ -квантами, нейтронами, электронами и протонами на образование радиационных дефектов в различных типах приборов с накоплением заряда и изменение их характеристик.

Ключевые слова: приборы с накоплением заряда, радиационные дефекты, радиационно-стойкие приборы

Введение

К приборам с формированием изображения видимого и ИК диапазонов относятся приборы с зарядовой связью (ПЗС), матрицы пассивных элементов (ПЗИ) и матрицы активных элементов (КМОП). У ПЗС самые низкие шумы, но большое энергопотребление, высокая стоимость и сложности, связан-

ные с переносом радиационно-индуцированного заряда. У ПЗИ проще осуществляется перенос заряда при произвольной выборке, они совместимы с КМОП-технологией и поэтому имеют меньшее энергопотребление и стоимость. Однако шумы у них больше, чем у ПЗС, вследствие чего ПЗИ непригодны для многих применений. Недавние разработки активного усиления внутри чувствительного элемента привели к появлению активных чувствительных элементов, которые обладают всеми преимуществами ПЗИ, но имеют намного меньшие шумы. Эта технология пока еще недостаточно отработана. Большинство проблем радиационной стойкости схожи для ПЗС и КМОП-приборов, поскольку основную роль в обоих случаях играют радиационные процессы в схеме обработки сигнала. В настоящей статье на основе литературных данных рассмотрены вопросы радиационной стойкости приборов с накоплением заряда.

Влияние облучения на приборы с накоплением заряда

ПЗС сначала разрабатывали в качестве запоминающих устройств, схем считывания, обработки сигнала и систем формирования изображения ИК детекторов. Некоторые из этих применений в настоящее время отмирают, но в качестве формирователей изображения в видимой области ПЗС по-прежнему используют широко.

ПЗС состоит из матрицы МОП-конденсаторов. На рис. 1 приведена типовая конструкция такого прибора, чаще всего реализуемая на эпитаксиальном материале *p*-типа толщиной 10...20 мкм.

Приложением смещения к одному из управляющих электродов создается потенциальная яма. Наличие скрытого канала *n*-типа проводимости приводит к тому, что минимум потенциала находится внутри кремния на глубине порядка 1 мкм, поэтому заряды находятся вдали от границы раздела кремний—диоксид кремния.

Приборы без скрытого канала называются приборами с поверхностным каналом, они позволяют быстрее передавать заряд, что существенно для ИК детекторов. Однако в настоящее время такие устройства используют в основном в схемах считывания.

Поскольку перенос заряда осуществляется почти без потерь, а шумы усилителя малы, ПЗС являются практически идеальными детекторами видимого излучения. При этом они весьма чувствительны к наличию решеточных дефектов, так как наличие даже отдельных дефектов в объеме кристалла может привести к эффектам захвата и появлению заметного темнового тока. Кроме того, возрастание заряда, индуцированного ионизацией в изолирующем слое, и генерация центров захвата на границе раздела приводит (как в любом МОП-устройстве) к сдвигу напряжения плоских зон, что влияет на напряжения смещения и синхронизации и вызывает появление тепловых токов утечки на поверхности. Кроме долговременных нарушений, заряды, создаваемые в кремнии воздействием заряженных частиц, рентгеновского и гамма-излучения, приводят к появлению нестационарных эффектов.

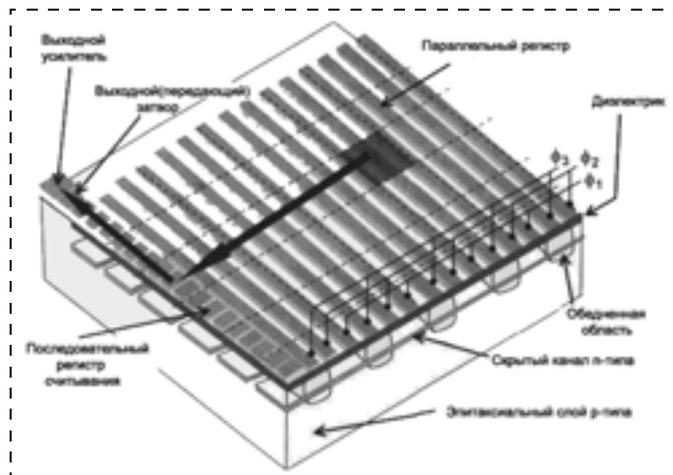


Рис. 1. Конструкция ПЗС с каналом *n*-типа проводимости

Работа ПЗС подробно рассмотрена в работах [1, 2], а влияние радиации на ПЗИ — в работах [3, 4]. Хотя основные механизмы нарушений и базовая конструкция ПЗС не изменились с момента их появления, однако ряд проблем до конца не решен. Появляются многообразные модификации и режимы работы, направленные на улучшение рабочих характеристик или уменьшение влияния радиационных эффектов в целях увеличения размеров приборов (или числа элементов). Иногда выпускают приборы с повышенной защитой, но даже в этом случае производитель редко гарантирует радиационную стойкость. Предсказать теоретически результат влияния радиации на качество изображения всегда было трудной задачей ввиду сложности учета влияния условий работы (например температуры и скорости синхронизации). Обычно для обоснования каждого конкретного случая требуется экспериментальная проверка. В результате складывается мнение, что ПЗС почти всегда коммерчески непривлекательны.

Однако возможность использования ПЗС в военных и космических целях привела к необходимости серьезного изучения радиационных эффектов. Первая обзорная работа на эту тему появилась в 1978 г. [5]. Основное внимание уделялось воздействию нейтронного и гамма-облучения на линейки и небольшие (порядка 100×100 элементов) матрицы, имевшиеся на тот момент. Основными параметрами, на которые обращалось внимание, были: сдвиг напряжения плоских зон, эффективность переноса заряда и рост среднего значения темнового тока. В то время приборы еще не были достаточно велики, чтобы интересоваться разбросом темнового тока по отдельным элементам.

При рассмотрении воздействия облучения быстрыми нейтронами ПЗС с *n*-каналом были обнаружены ловушечные уровни, лежащие на 0,14, 0,23 и 0,41 эВ ниже дна зоны проводимости. Они были идентифицированы как А-центры (комплекс вакансии — атом кислорода), дивакансии и комплексы дивакансия — Е-центр (состоящий из вакансии и атома фосфора), соответственно. Для последнего уровня разделение дефекта на дивакансию и Е-центр пока не представляется убедительным. В работах [6, 7] доказываются наличие еще, по крайней мере, одного дефекта с

уровнем на 0,3 эВ ниже дна зоны проводимости, ответственного за появление примерно 80 % ловушек.

Исследовалась также связь между решеточными дефектами и объемным темновым током. Природа дефектов, ответственных за появление темнового тока в обедненных областях, окончательно не установлена, но автор работы [8], проанализировав данные для различных типов радиации и примесей в кремнии, пришел к выводу, что основным дефектом, определяющим появление объемного темнового тока, является дивакансия. Он также определил скорость дефектообразования — $(1,9 \pm 0,6)10^5$ носителей/см⁻³ · с при потоке облучения 1 МэВ/г при 300 К.

Линейная зависимость между плотностью поверхностных состояний и поверхностным темновым током была получена автором работы [9]. В работе [10] было установлено, что инверсия поверхности ПЗС приводит к заполнению ловушек и подавлению темнового тока. Вскоре после этого была разработана конструкция ПЗС, в которой можно инвертировать всю (или почти всю) поверхность. Такие приборы оказались более стойкими к ионизационным воздействиям, поскольку поверхностный темновой ток стал несущественным.

Другим вопросом, вызывавшим значительный интерес, был вопрос возникновения нестационарных процессов при воздействии гамма-излучения большой мощности. В работе [12] показано, что шумы, вызванные мощным гамма-излучением, приводят к увеличению флуктуационных шумов изображения.

В течение 80-х годов прошлого века размеры и качество изготовления ПЗС постоянно росли, их разрабатывали для разнообразных целей, включая работу в космосе. Например, ПЗС стали широко использовать в системах астронавигации, и несколько матриц фокальной плоскости было изготовлено для астрономических систем космического базирования (например, ПЗС 800 × 800 для космического телескопа "Хаббл" [13] и проекта "Галилео" [14]).

В работах [15, 16] рассмотрено нейтронное и протонное воздействия, при которых могут происходить упругие (кулоновское рассеяние и упругое рассеяние на ядрах) и неупругие (ядерные превращения) взаимодействия. Эти работы показали, что выбросы темнового тока, индуцированные протонным облучением, сильно влияют на работу приборов космического базирования (рис. 2).

Выбросы темнового тока могут быть вызваны не только неупругими взаимодействиями, дающими большой энергетический вклад и создающими большое количество дефектов, но и упругими взаимодействиями, происходящими в области сильного поля. В этом случае темновой ток может возрасти на несколько порядков, благодаря усиленной полевому эмиссии. Авторы работы [17] предложили модель, позволяющую рассчитать распределение неоднородности темнового тока в отсутствие

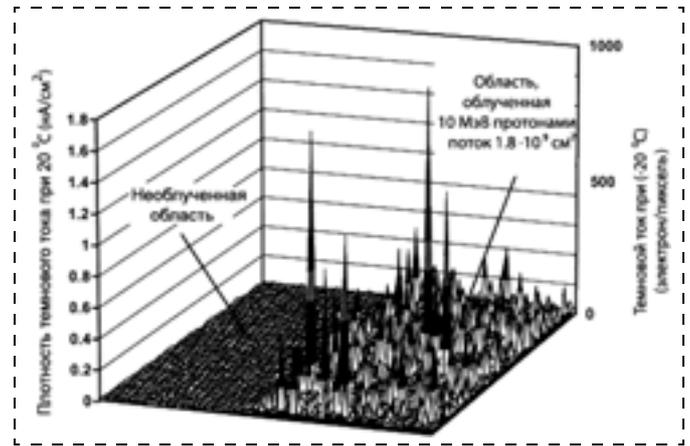


Рис. 2. Выбросы темнового тока в ПЗС, облученном протонами

эмиссии, усиленной полем. Модификация этой модели приведена в работе [18].

В 80-х годах прошлого века была разработана модель NIEL [19], позволяющая определить эквивалент доз за счет смещения (в мегаэлектрон-вольтах на грамм) и за счет ионизации для частиц различного вида и различных энергий. Результаты, полученные для протонного облучения кремния, приведены в работе [20] и уточнены в [21]. Данные этих работ различаются незначительно, учитывая погрешности расчета и эксперимента. Например, для 10 и 60 МэВ протонов по NIEL получено отношение 2,2 в работе [20] и 3,3 — в работе [21].

И в 90-е годы многие исследователи занимались изучением радиационных явлений в ПЗС. В работах [22, 23] показано, что деградация эффективности переноса заряда при протонном облучении может быть очень существенной, особенно при малых уровнях сигнала. Этот эффект сильно зависит от уровня фонового сигнала, времени синхронизации (времени задержки в элементе), температуры и уровня сигнала. На рис. 3 приведены типичные зависимости параметра СТИ ($СТИ = 1 - b$, где b — эффективность переноса заряда) для ПЗС с размерами элемента, 22,5 × 22,5 мкм, включая охранный кольце, от уровня фонового излучения.

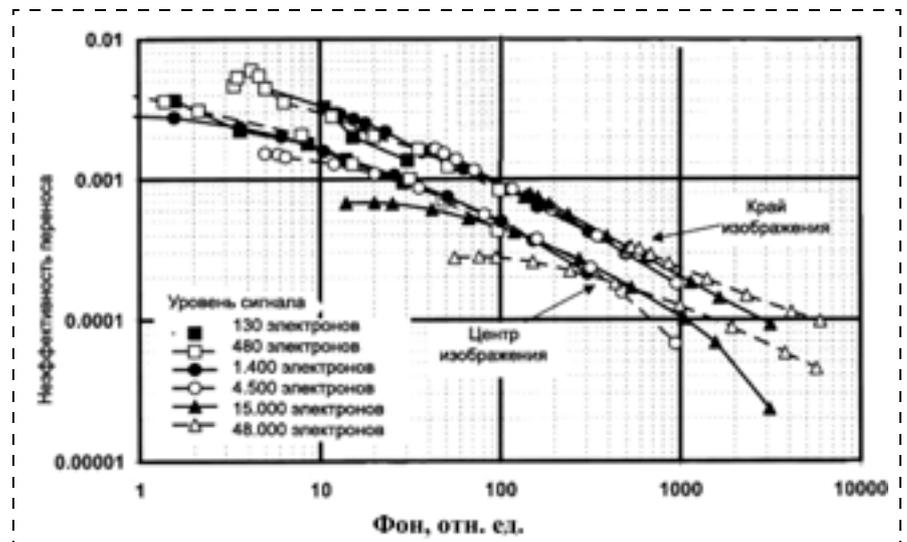


Рис. 3. Эффективность переноса заряда для ПЗС02 [24]

Основной дефект, определяющий нарушения СТИ, лежит на 0,44 эВ ниже дна зоны, и при низкой температуре постоянно заполнен, что существенно улучшает эффективность переноса заряда.

Эти данные позволяют оценить значение СТИ фактора в различных ситуациях, но точность этих оценок невелика. Рекомендуется, если есть возможность, проводить тестирование реальных приборов в рабочих условиях. Даже, если значение СТИ известно, необходимо еще рассчитать влияние воздействия на качество изображения. В работе [25] предложена модель расчета рабочих характеристик ПЗС для некоторых условий работы, но для других условий потребуется экстраполяция полученных результатов.

ПЗС устойчивы до доз порядка $5 \cdot 10^8$ МэВ/г, даже при больших уровнях сигнала. Уменьшить деградацию коэффициента переноса заряда можно отжигом, но на практике этот метод не используется, так как он требует температуры порядка 100 °С. Для уменьшения влияния E -центров предлагалось использовать приборы с p -каналом [26], но для этого необходимо изменение конструкции.

В некоторых элементах ПЗС после облучения возникает непостоянный во времени темновой ток, приводящий к переключению элементов [27]. Этот эффект получил название случайного телеграфного сигнала. Обычно сильные флуктуации отмечаются в незначительном числе элементов, но число малых отклонений велико, и их тоже нужно учитывать во всех случаях, когда неоднородность темнового тока может играть существенную роль.

В 1990-х годах проводились исследования дефектов, индуцированных ионизацией. Типичный сдвиг напряжения плоских зон для серийных ПЗС составляет 0,1 В/крад [28] при наличии смещения и от трети до половины этого значения без смещения. Такой сдвиг будет влиять на рабочие характеристики выходного усилителя при дозах более 10 крад, и значение напряжения синхронизации сдвигается в отрицательную сторону. Если не подавлять поверхностный темновой ток, то часто он возрастает (примерно в 2 раза) под металлической пленкой, которую используют для защиты от освещения обогащенной области и эталонных элементов. К счастью, во многих случаях космическая аппаратура подвергается облучению с меньшими дозами, и ионизационными эффектами можно пренебречь.

Уже отмечалось, что работа в режиме инверсии уменьшает поверхностный темновой ток, определяемый наличием ионизационно-индуцированных дефектов. Авторы работы [29] показали, что непрерывная синхронизация позволяет поддерживать поверхностные ловушки заполненными. Уровень защиты можно увеличить и применением более тонкого либо двойного (диоксид/нитрид) диэлектрического слоя, однако применение таких специализированных устройств снижает производительность.

Так как серийные ПЗС обычно не подходят для работы в условиях большой дозы облучения (более нескольких десятков грей) или большого потока протонов, то используют более стойкие серийные приборы, такие как ПЗИ или КМОП. В ПЗИ нет проблем с переносом заряда, так как фотоиндуци-

рованные заряды накапливаются непосредственно в чувствительном элементе и считываются с помощью КМОП-коммутатора. Но шумы в ПЗИ существенно выше, чем в ПЗС.

В последние годы в тех космических применениях, где не нужны сверхнизкие шумовые характеристики, с ПЗС успешно конкурируют радиационно-стойкие матрицы с активными элементами. В таких приборах в каждом чувствительном элементе — свой выходной усилитель, что позволяет получать шумовые характеристики, сравнимые с ПЗИ. Произвольная выборка и возможность считывания без разрушения данных позволяют получить характеристики, приближающиеся к ПЗС. Преимущества матриц с активными элементами основаны на использовании стандартных КМОП-конструкций и технологий и заключаются в высокой степени интеграции и малом энергопотреблении системы формирования изображения (возможность создания "камеры на микросхеме" [30]). Для космических применений хорошо то, что такие устройства имеют прямую адресацию пикселей, поэтому нет протонно-индуцированных потерь при переносе заряда как в ПЗС. Однако при протонном облучении в них отмечается возрастание и неоднородности темнового тока, шум фиксированного распределения и случайный телеграфный шум.

К настоящему моменту довольно мало работ, посвященных радиационным эффектам в КМОП-матрицах. В работе [31] приведены результаты влияния протонного и гамма-облучения на приборы (фотодиоды и фотозатворы) производства компании *Austria Micro System*. Показано, что основными параметрами при деградации являются возрастание и появление неоднородностей темнового тока, шум фиксированного распределения, причем эти явления сильнее проявляются в фотозатворах. В работе [32] отмечается, что ухудшение рабочих характеристик при облучении определяется влиянием ионизационных дефектов, чего и следовало ожидать для неконтактной КМОП-технологии, использованной авторами работы.

В следующих работах были подробно исследованы фотодиодные КМОП-приборы производства бельгийской компании IMEC. Влияние излучения ^{60}Co на фотодиоды, специально разработанные для повышения радиационной стойкости, рассматривалось в работе [33], а влияние излучения ^{60}Co , облучения протонами и тяжелыми ионами на матрицу 512×512 — в работе [34]. Увеличение темнового тока и образование "горячих пикселей" при протонном облучении оказалось схожим с этими явлениями в ПЗС. Выбросы темнового тока были отнесены на счет повышения электрического поля, хотя их амплитуда оказалась меньше типичной для ПЗС. Эффект случайного телеграфного сигнала был обнаружен примерно в 50 % пикселей. Этот эффект составляет значительную часть общего сигнала в приборах с активными пикселями, в то время как максимальный эффект в ПЗС составлял около 10 %. Было отмечено снижение чувствительности детекторов при протонном облучении, которое составило около 30 % при потоке $10 \text{ МэВ протонов } 7,2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. Это изменение

сохранялось в течение 7 месяцев, но постепенно исчезло в интервале 7,5—14 месяцев после облучения. Необходимо отметить, что снижение чувствительности не обнаружено в ПЗС.

В работе [35] исследовались серийные приборы Ibis4 и STAR-250 (радиационно-стойкий). Хотя STAR-250 по паспорту допускает облучение ^{60}Co дозой до 10 Мрад, были отмечены рост и выбросы темнового тока, а также эффект телеграфного сигнала, характерные для обычных устройств [36]. Незначительное преимущество заключалось в том, что скорость роста темнового тока была меньше, чем для типичных ПЗС, даже если исходное значение темнового тока было выше.

Радиационную стойкость КМОП-матриц можно повысить, применяя технологию *Hardening-by-design* [35, 37]. Сенсоры фирмы *Photobit*, сделанные по этой технологии, показали стойкость до дозы ионизирующего излучения 30 Мрад.

Заключение

Исследование радиационных эффектов в ПЗС по-прежнему остается актуальным, особенно для космических применений. Хотя в этих областях преобладают КМОП-матрицы, ПЗС все еще довольно широко применяют, поскольку зачастую они имеют меньшие шумы, лучшую стабильность отклика и свободны от эффекта запаздывания.

Для некоторых космических проектов требуются большие матрицы фокальной плоскости, в связи с чем есть необходимость более подробного исследования ловушек переносимого заряда. Даже сегодня нет уверенности в полноте описания дефектной структуры и ее зависимости от качества исходного кремния и энергии протонов. Необходимы также развитие модельных представлений и разработка способов заполнения ловушек.

Для космической астрономии и наблюдения Земли из космоса потребуются более подробное исследование эффекта случайного телеграфного сигнала. Вполне вероятно, что работы будут сосредоточены на определении числа элементов, в которых этот эффект проявляется. Дефекты, определяющие возникновение этого эффекта, до сих пор не идентифицированы.

Пока еще детально не изучено влияние протонного облучения и отжига на возникновение выбросов темнового тока и эффективность переноса зарядов. Важным представляется и разработка моделей возникновения нестационарностей.

Технология КМОП представляется перспективной для создания бортовой аппаратуры, не требующей сверхнизких шумовых характеристик, достигаемых только в ПЗС. ПЗС и КМОП-приборы можно сделать устойчивыми к ионизирующему воздействию, но остаются проблемы с дефектами смещения. Преимуществом КМОП-приборов является наличие только одного такта переноса заряда при считывании сигнала, поэтому для них несущественны индуцированные протонным облучением потери эффективности переноса заряда, как в ПЗС. Но изучение причин роста темнового тока, появления выбросов тока и телеграфного сигнала остаются актуальными и для КМОП-структур.

1. **Janesick J. R.** Scientific Charge-Coupled Devices. Bellingham: SPIE, 2001.
2. **Theuwissen J. P.** Solid-State Imaging With Charge-Coupled Devices. Dordrecht. Kluwer, 1995.
3. **Marshall C. J., Marshall P. W.** Proton effects and test issues for satellite designers—Part B: Displacement damage effect // IEEE NSREC Short Course Notes 1999. P. IV-50—IV-110.
4. **Hopkinson G. R., Dale C. J., Marshall P. W.** Proton effects in CCDs // IEEE Trans. Nucl. Sci. Apr. 1996. Vol. 43. P. 614—627.
5. **Killiany J. M.** Radiation effects on silicon charge-coupled devices // IEEE Trans. Components, Hybrids Manuf. Tech. Dec. 1978. P. 353—365.
6. **Prigozhin G.** et al. Characterization of the radiation damage in the Chandra X-ray CCDs // Proc. SPIE. Aug. 2000. Vol. 4140. P. 123—134.
7. **Hopkinson G. R.** Proton-induced charge transfer degradation at low operating temperatures // IEEE Trans. Nucl. Sci. Dec. 2001. Vol. 48. P. 1790—1795.
8. **Srouf J. R., Lo D. H.** Universal damage factor for radiation-induced dark current in silicon devices // IEEE Trans. Nucl. Sci. Dec. 2000. Vol. 47. P. 2451—2459.
9. **Saks N. S.** Interface state trapping and dark current generation in buried-channel charge-coupled devices // J. Appl. Phys. 1982. Vol. 53, N 3. P. 1745—1753.
10. **A technique** for suppressing dark current generated by interface states in buried channel CCD imagers // IEEE Electron. Device Lett. July 1980. Vol. 1, N 7.
11. **Saks N. S., Killiany J. M., Reid P. R., Baker W. D.** A radiation hard MNOS CCD for low temperature applications // IEEE Trans. Nucl. Sci. Dec. 1979. Vol. 26. P. 5074—5080.
12. **Liebe C. C.** Charged particle-induced noise in camera systems // IEEE Trans. Nucl. Sci. Aug. 2001. Vol. 48. P. 1541—1549.
13. **Trauger J. T.** Sensors for the Hubble Space Telescope wide field and planetary cameras (1 and 2) // Proc. Conf. CCD's in Astronomy, Tucson, AZ, Sept. 6—8, 1989. Astronomical Soc. Pacific. 1990. P. 217—230. See also: Woodgate B. E. The use of CCD's in the Space Telescope Imaging Spectrograph (SIS), *ibid.* P. 237—257.
14. **Klaasen K. P., Clarey M., Janesick J.** Charge-coupled device television camera for NASA's Galileo Mission to Jupiter // Opt. Eng. 1984. Vol. 23. P. 334—342.
15. **Srouf J. R., Hartmann R. A.** Effects of single neutron interactions in silicon integrated circuits // IEEE Trans. Nucl. Sci. Dec. 1985. Vol. 32. P. 4195—4200.
16. **Srouf J. R., Hartmann R. A., Kitazaki K. S.** Permanent damage introduced by single proton interactions in silicon devices // IEEE Trans. Nucl. Sci. Dec. 1986. Vol. 33. P. 1957—1966.
17. **Marshall P. W., Dale C. J., Burke E. A.** Proton-induced displacement damage distribution in silicon microvolumes // IEEE Trans. Nucl. Sci. Dec. 1990. Vol. 37. P. 1776—1783.
18. **Robbins M. S.** High-energy proton-induced dark signal in silicon charge coupled devices // IEEE Trans. Nucl. Sci. Dec. 2000. Vol. 47. P. 2473—2479.
19. **Van Lint V. A. J., Gigas G., Barendt J.** Correlation of displacement effects produced by electrons, protons and neutrons in silicon // IEEE Trans. Nucl. Sci. Dec. 1975. Vol. 22. P. 2663—2668.
20. **Dale C. J., Chen L., McNulty P. J., Marchall P. W., Burke E. A.** A comparison of Monte Carlo and analytical treatments of displacement damage in Si microvolumes // IEEE Trans. Nucl. Sci. Dec. 1994. Vol. 41. P. 1974—1983.
21. **Akerman, Barak J., Chadwick M. B., Levinson J., Murrat M., Lifshitz Y.** Updated NIEL calculation for estimating the damage induced by particles and rays in Si and GaAs // Radiation Phys. Chemistry. 2001. Vol. 62. P. 301—310.
22. **Waczynski, Polidan E. J., Marshall P. W., Reed R. A., Johnson S. D., Hill R. J., Delo G. S., Wassell E. J., Cheng E. S.** A comparison of charge transfer efficiency measurement techniques on proton damaged CCD's for the Hubble Space Telescope wide-field camera 3 // IEEE Trans. Nucl. Sci. Dec. 2001. Vol. 48. P. 1807—1814.
23. **Kimble R. A., Goudfrooij P., Gilliland R. L.** Radiation damage effects on the CCD detector of the space telescope imaging spectrograph // Proc. SPIE. July 2000. Vol. P. 532—545.

24. **Hopkinson G. R.** Proton-induced changes in CTE for n-channel CCD's and the effect on star tracker performance // IEEE Trans. Nucl. Sci. Dec. 2000. Vol. 47. P. 2460–2465.
25. **Philbrick R. H.** Modeling the impact of preflushing on CNE in proton irradiated CCD-based detectors // IEEE Trans. Nucl. Sci. Apr. 2002. Vol. 49. P. 559–567.
26. **Bebek C.** et al. Proton radiation damage in P-channel CCD's fabricated on high-resistivity silicon // IEEE Trans. Nucl. Sci. June 2002. Vol. 49. P. 1221–1225.
27. **Hopkins I. H., Hopkinson G. R.** Further measurements of random telegraph signals in proton irradiated CCDs // IEEE Trans. Nucl. Sci. Dec. 1995. Vol. 42. P. 2074–2081.
28. **Robbins M. S., Roy T., Hedges S. J., Holmes-Siedle A., McKemey A. K., Watts S. J.** Quality control and monitoring of radiation damage in charge coupled devices at the Stanford Linear Collider // IEEE Trans. Nucl. Sci. Dec. 1993. Vol. 40. P. 1561–1566.
29. **Burke B., Gajar S. A.** Dynamic suppression of interface-state dark current in buried channel CCDs // IEEE Trans. Electron. Devices. Feb. 1991. Vol. 38. P. 285–290.
30. **Fossum E. R.** CMOS image sensors: Electronic camera-on-a-chip // IEEE Trans. Electron. Devices. Oct. 1997. Vol. 44. P. 1680–1698.
31. **Cohen M., David J. P.** Radiation effects on active pixel sensors // Proc. Radecs. 1999. P. 450–456.
32. **Radiation-induced** dark current in CMOS active pixel sensors // IEEE Trans. Nucl. Sci. Dec. 2000. Vol. 47. P. 2485–2491.
33. **Bogaerts J., Dierickx B.** Total dose effects on CMOS active pixel sensor // Proc. SPIE Photonics West. San Jose, CA. 2000. Jan. 24. Vol. 4134.
34. **Hopkinson G. R.** Radiation effects in a CMOS active pixel sensors // IEEE Trans. Nucl. Sci. Dec. 2000. Vol. 47. P. 2480–2484.
35. **Bogaerts J., Dierickx B., Mertens R.** Enhanced dark current generation in proton-irradiated CMOS active pixel sensors // IEEE Trans. Nucl. Sci. June 2002. Vol. 49. P. 1513–1521.
36. **Random** telegraph signals in a radiation-hardened CMOS active pixel sensor // IEEE Trans. Nucl. Sci. Feb. 2002. Vol. 49. P. 249–257.
37. **Eid E.-S., Chan T. Y., Fossum E. R., Tsai R. H., Spagnuolo R., Deily J., Byers W. B., Peden J. C.** Design and characterization of ionizing radiation-tolerant CMOSAPS image sensors up to 30 Mrd(Si) total dose // IEEE Trans. Nucl. Sci. Dec. 2001. Vol. 48. P. 1796–1806.

УДК 621.3. 049.77.002.5

В. П. Драгунов, д-р техн. наук, нач. отдела подготовки кадров высшей квалификации,
Д. И. Остертак, аспирант, ассистент каф.,
Новосибирский государственный
технический университет,
e-mail: drag@adm.nstu.ru, ostertak@ngs.ru

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В МЭМС С ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ. ЧАСТЬ I. РАСЧЕТ ЕМКОСТЕЙ

Сравниваются различные подходы к расчету зависимости емкости плоского конденсатора, содержащего два одинаковых прямоугольных или круглых параллельных электрода, от межэлектродного зазора и взаимного смещения электродов. Рассчитываются погрешности в оценках емкости при использовании различных подходов. Приводится аналитическое выражение для расчета емкостей при изменении площади перекрытия электродов.

Ключевые слова: МЭМС, электрическая емкость, плоский конденсатор, краевые эффекты, аналитические выражения

Введение

При проектировании МЭМС [1] возникает необходимость в оценке взаимного смещения элементов конструкции при различных внешних воздействиях. Решение этой задачи предполагает определение компонентов внешних сил и расчет смещений упругих элементов при действии некой обобщенной силы, эффективно отражающей одновременное действие сил различной природы. При этом в целом оценки должны проводиться самосогласованно.

Исторически оказалось, что наиболее проработанным в настоящее время оказался второй этап — расчет смещений упругих элементов при действии некой обобщенной силы [2, 5]. Что же касается определения компонентов внешних сил, то здесь ситуация не так однозначна. Особенно это касается электростатических взаимодействий.

Как правило, расчет электростатических сил осуществляются на основе соотношений между потенциальной энергией W и соответствующими компонентами электростатической силы:

$$F_x = -\frac{dW}{dx}, \quad F_y = -\frac{dW}{dy}. \quad (1)$$

Рассматривая элементы конструкции МЭМС как электроды соответствующего конденсатора, выражение для энергии электрического поля между этими элементами можно представить в виде:

$$W = \frac{Q^2}{2C} = \frac{CV^2}{2}, \quad (2)$$

где Q — заряд на обкладках конденсатора; V — напряжение на конденсаторе; C — его емкость.

Согласно (1) и (2) при расчете значений компонентов электростатической силы возникает необходимость в оценке электрической емкости между элементами конструкции МЭМС. В настоящее время в подавляющем большинстве случаев такие оценки проводят в рамках модели идеального плоского конденсатора (ИПК) [6–8]. Следует, однако, отметить, что модель ИПК не учитывает краевые эффекты. Поэтому при ее использовании остается открытым вопрос о пределах применимости данной модели, особенно при проектировании МЭМС с малыми отношениями линейных размеров электродов к межэлектродным зазорам.

Эта проблема еще больше обостряется при расчете компонент электростатической силы, которые

согласно (1) и (2) оказываются пропорциональными производным емкости по соответствующим координатам.

В данной статье проводится сравнение различных подходов к расчету зависимостей емкости плоского конденсатора, содержащего два одинаковых прямоугольных или круглых параллельных электрода, от межэлектродного зазора и взаимного смещения электродов.

Результаты расчетов и их анализ

Расчет емкости плоского конденсатора с прямоугольными электродами при изменении межэлектродного зазора. Согласно [9] в случае, когда длина электрода a много больше ширины электрода b , выражение для расчета емкости конденсатора, содержащего два одинаковых плоских прямоугольных параллельных электрода, имеет вид

$$C = \epsilon_0 \epsilon a \frac{\mathbf{K}(k)}{\mathbf{K}(k')}, \quad (3)$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная; ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость; $\mathbf{K}(k)$ и $\mathbf{K}(k')$ — связанные полные нормальные эллиптические интегралы Лежандра первого рода; k и $k' = \sqrt{1 - k^2}$ — дополнительные модули. В формуле (3) k является корнем уравнения

$$\frac{2}{\pi} [\mathbf{K}(k)E(\beta, k) - \mathbf{E}(k)\mathbf{F}(\beta, k)] - \frac{b}{d} = 0, \quad (4)$$

где $\mathbf{E}(k)$ — полный нормальный эллиптический интеграл Лежандра второго рода; $\mathbf{F}(\beta, k)$ и $\mathbf{E}(\beta, k)$ — нормальные эллиптические интегралы Лежандра первого и второго рода соответственно; d — межэлектродный зазор;

$$\beta = \arcsin\left(\frac{1}{k} \sqrt{1 - \frac{\mathbf{E}(k)}{\mathbf{K}(k)}}\right). \quad (5)$$

Зависимость нормированной емкости $\tilde{C}(b/d = C(b/d)/(\epsilon_0 \epsilon a))$, рассчитанная с использованием формул (3)–(5), приведена на рис. 1 (кружки).

Расчет емкостей с использованием выражения (3) на этапе предварительного проектирования представляется излишне громоздким. Кроме того, при $b/d > 10$ появляются еще и чисто технические трудности. В результате оценки емкостей на этом этапе, как правило, проводят с использованием приближенных выражений. При этом наибольшее распространение получили расчеты, основанные на модели ИПК.

На рис. 1 приведена зависимость нормированной емкости $\tilde{C}_0 = C_0/(\epsilon_0 \epsilon a)$ от отношения ширины электрода b к межэлектродному зазору d , рассчитанная в рамках модели ИПК, где

$$C_0 = \epsilon_0 \epsilon a \frac{b}{d}. \quad (6)$$

Видно, что оценки, сделанные с использованием формулы (6), занижают значения емкости. При этом погрешность расчетов не превышает 10 %, только если значение $b/d > 16,5$, и 5 %, если $b/d \geq 40$.

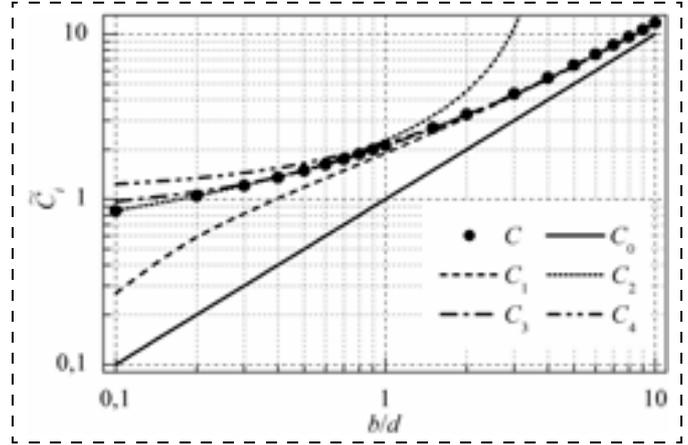


Рис. 1. Зависимость нормированной емкости \tilde{C}_i от отношения ширины электрода b к межэлектродному зазору d

Для расширения диапазона значений b/d , для которых оценки емкостей могут быть проведены с приемлемой погрешностью, еще в 1973 г. Пальмером [10] была предложена формула

$$C_1 = C_0 \left[1 + \frac{1}{\pi} \frac{d}{b} \left(1 + \ln \left(2\pi \frac{b}{d} \right) \right) \right], \quad (7)$$

позволяющая рассчитывать емкости с погрешностью менее 10 % уже при $b/d \geq 1$ и менее 5 % — при $b/d > 1,6$. На рис. 1 приведена соответствующая зависимость $\tilde{C}_1 = C_1/(\epsilon_0 \epsilon a)$, рассчитанная с использованием формулы (7). Видно, что (7) также несколько занижает оценку емкости. Однако по сравнению с (6) точность расчета значительно увеличивается.

Для расчета емкостей при $b/d < 1$ в литературе предлагается использовать выражение

$$C_2 = \epsilon_0 \epsilon a \pi / \ln \left(4 \frac{d}{b} \right). \quad (8)$$

Расчеты показывают (см. рис. 1), что при использовании формулы (8) погрешность в оценках емкостей при $b/d \leq 1,13$ будет менее 10 %, а при $b/d \leq 0,84$ — уже менее 5 %.

Анализ показывает, что, используя формулу

$$C_3 = C_0 \left\{ 1 + \frac{1}{\pi} \frac{d}{b} \left(1 + \theta_1 \ln[2\pi] + \ln \left[\frac{b}{d} + \theta_2 \right] \right) \right\} \quad (9)$$

(θ_i — подбираемые коэффициенты), можно существенно расширить диапазон значений b/d , при которых ошибка в оценках емкости не превысит допустимых значений. Так, при $\theta_1 = 1,03$ и $\theta_2 = 0,75$ ошибка в оценках емкости будет менее 1 % при $b/d \geq 0,4$ (см. рис. 1), что фактически перекрывает диапазон актуальных для МЭМС значений отношения b/d .

При необходимости для оценки емкости можно воспользоваться и упрощенным выражением

$$C_4 = C_0 \left[1,05 + \theta_3 \frac{d}{b} \right]. \quad (10)$$

Правда, при этом ошибка в оценке емкости несколько возрастет. Так, при $\theta_3 = 1,13$ ошибка в оцен-

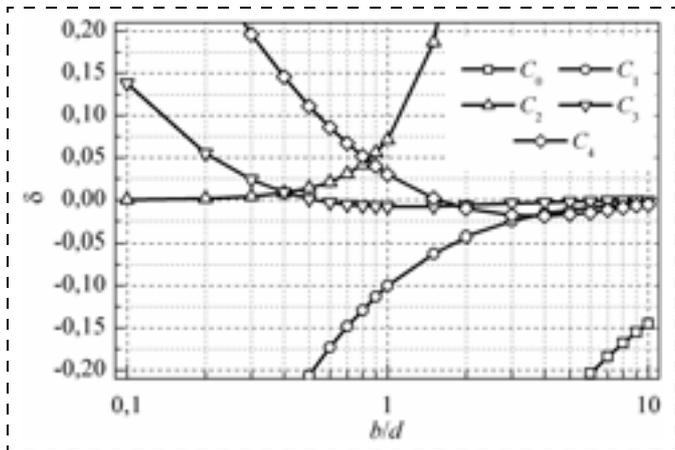


Рис. 2. Зависимость ошибки в оценке емкости при использовании в расчетах выражений (6)–(10) от отношения ширины электрода b к межэлектродному зазору d

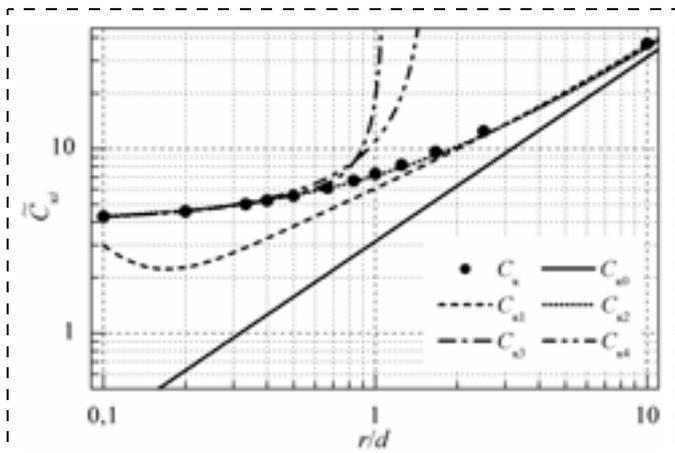


Рис. 3. Зависимость нормированной емкости \tilde{C}_{ki} от отношения радиуса электрода r к межэлектродному зазору d

ке емкости будет менее 10 % лишь при $b/d \geq 0,54$ (см. рис. 1). Варьируя θ_3 , диапазон значений b/d , для которых ошибка в оценке емкости не превысит заданных значений, можно изменять.

На рис. 2 приведены зависимости ошибки $\delta = C_i/C - 1$ в оценках емкости плоского конденсатора, содержащего два одинаковых прямоугольных параллельных электрода, от отношения ширины электрода b к межэлектродному зазору d при расчетах с использованием выражений (6)–(10).

Расчет емкости плоского конденсатора с круглыми электродами. Согласно [9] выражение для расчета емкости конденсатора, содержащего два одинаковых плоских круглых параллельных электрода, имеет вид

$$C_k = 4\epsilon_0\epsilon r \int_0^1 f(x) dx. \quad (11)$$

Здесь $f(x)$ — решение неоднородного уравнения Фредгольма II рода

$$f(x) - \frac{d}{r} \frac{1}{\pi} \int_0^1 \frac{f(s)}{(x-s)^2 + (d/r)^2} ds = 1,$$

где d — межэлектродный зазор, а r — радиус электрода.

Зависимость нормированной емкости $\tilde{C}_k(r/d) = C_k(r/d)/(\epsilon_0\epsilon r)$, рассчитанная с использованием формулы (11), приведена на рис. 3 (кружки).

На этом же рисунке приведена зависимость нормированной емкости $\tilde{C}_{k0} = C_{k0}/(\epsilon_0\epsilon r)$ от отношения радиуса электрода r к межэлектродному зазору d , рассчитанная в рамках модели ИПК,

$$C_{k0} = \epsilon_0\epsilon \frac{\pi r^2}{d}. \quad (12)$$

Видно, что оценки, сделанные с использованием формулы (12), занижают значение емкости. При этом, как и в случае конденсатора с прямоугольными электродами, погрешность расчетов не превышает 10 %, только если значение $b/d > 16,5$, и 5 %, если $b/d \geq 40$.

Для расширения диапазона значений r/d , при которых оценки емкостей могут быть проведены с приемлемой погрешностью, в литературе предлагаются следующие выражения:

$$C_{k1} = \epsilon_0\epsilon r \left[\pi \frac{r}{d} + \ln \left(16\pi \frac{r}{d} \right) - 1 + \frac{1}{4\pi} \frac{d}{r} \left(\ln \left(\frac{d}{2r} \right) \right)^2 \right]; \quad (13)$$

$$C_{k2} = \epsilon_0\epsilon r \left(\pi \frac{r}{d} + 4 \right); \quad (14)$$

$$C_{k3} = \epsilon_0\epsilon r \frac{4}{1 - 2r/(\pi d)}; \quad (15)$$

$$C_{k4} = \epsilon_0\epsilon r \frac{4}{1 - \frac{2r}{\pi d} \left(1 - \frac{7}{12} \left(\frac{r}{d} \right)^2 + \frac{33}{40} \left(\frac{r}{d} \right)^2 \right)}. \quad (16)$$

Результаты расчета зависимостей нормированной емкости $\tilde{C}_{ki} = C_{ki}/(\epsilon_0\epsilon r)$, где $i = 1, 2, 3, 4$, от отношения радиуса электродов r к межэлектродному зазору d , полученные с использованием формул (13)–(16), приведены на рис. 3. Видно, что выражение (14) позволяет рассчитывать зависимости емкости конденсатора с круглыми электродами от отношения радиуса электродов к межэлектродному зазору с приемлемой точностью практически во всем (актуальном для МЭМС) диапазоне отношений r/d . В свою очередь, используя выражения (13), (15) и (16), можно несколько увеличить точность расчетов, но в существенно более узких интервалах отношений r/d .

Соответствующие зависимости ошибки $\delta = C_{ki}/C_k - 1$ в оценке емкости от отношения радиуса электродов r к межэлектродному зазору d при использовании в расчетах выражений (12)–(16) показаны на рис. 4.

Расчет емкости плоского конденсатора с прямоугольными электродами при изменении площади перекрытия электродов. При разработке МЭМС возникает необходимость в оценке емкостей и компонент электростатических сил между элементами конструкции системы, которые можно представить как

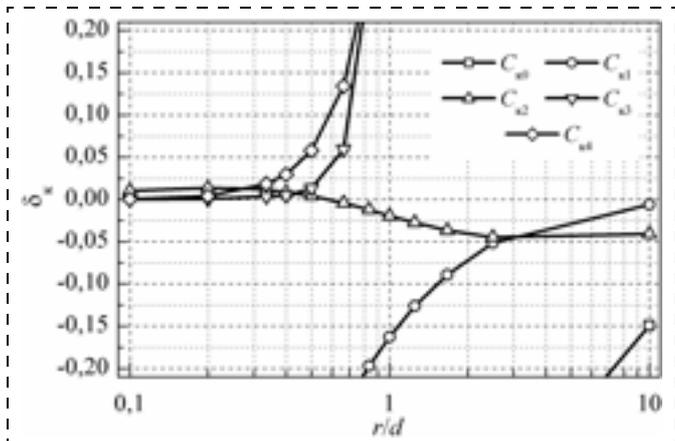


Рис. 4. Зависимости ошибки в оценке емкости при использовании в расчетах выражений (12)–(16) от отношения радиуса электродов r к межэлектродному зазору d

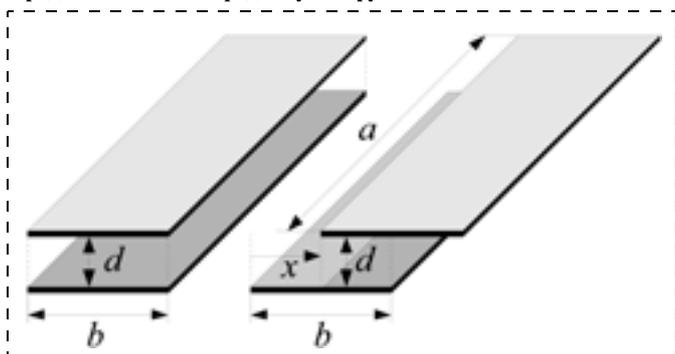


Рис. 5. Двухэлектродная плоскопараллельная конструкция с несмещенными и смещенными друг относительно друга электродами

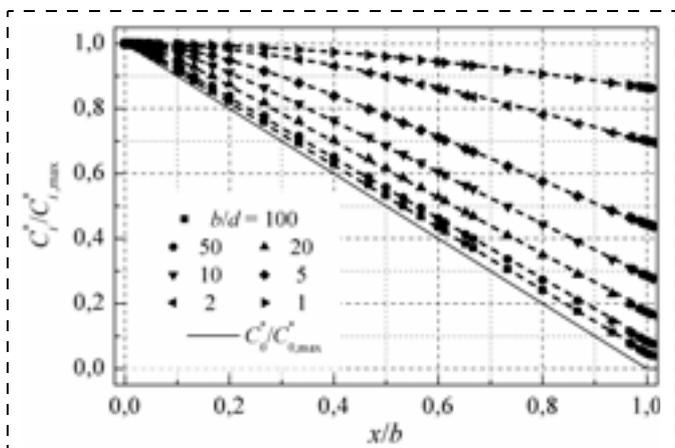


Рис. 6. Зависимости нормированной емкости $C_i^*/C_{i,max}^*$ от относительного смещения электродов. Маркеры — численный расчет, сплошная линия — расчет в рамках ИПК, штриховые линии — расчет с использованием (17)

плоский конденсатор со смещенными электродами (рис. 5).

В настоящее время в подавляющем большинстве случаев такие оценки проводят в рамках модели ИПК с использованием выражения

$$C_0^* = \frac{\epsilon_0 \epsilon a (b - |x|)}{d},$$

где $|x| \leq b$.

Соответствующая зависимость нормированной емкости $C_0^*(x)/C_{0,max}^*$, где $C_{0,max}^* = C_0^*(0)$, от взаимного смещения электродов, приведена на рис. 6 сплошной линией. В этом приближении зависимость емкости от смещения электродов оказывается линейной, а значение емкости при $|x|/b \geq 1$ равно нулю. В результате отношение максимального значения емкости к минимальному (глубина модуляции емкости) при смещении электродов в рамках модели ИПК равно бесконечности.

Для оценки влияния краевых эффектов на емкость плоского конденсатора со смещенными электродами нами были проведены численные расчеты, подробности которых приведены в работах [11, 12]. Результаты численных расчетов представлены на рис. 6 маркерами. Видно, что результаты численных расчетов существенно отличаются от расчетов, выполненных в рамках модели ИПК. Причем это различие увеличивается при уменьшении отношения b/d и, что особенно существенно, по мере уменьшения отношения b/d отношение максимального значения емкости к значению емкости, соответствующему полному смещению электродов ($x/b = 1$) относительно друг друга, быстро уменьшается. В результате при полном смещении электродов относительно друг друга глубина модуляции емкости оказывается существенно меньше, чем предсказывает модель ИПК.

Чтобы иметь возможность оценивать емкость, не прибегая к достаточно громоздким численным расчетам, нами было найдено аналитическое выражение

$$C_3^* = C_3 \left[1 - \theta \left\{ \frac{|x|}{b} - \frac{b}{d} \left(1 - \exp\left(-\frac{b}{d} \frac{|x|}{b}\right) \right) \right\} \right], \quad (17)$$

где коэффициент $\theta = 1,0366 - 2,2275/[1 + 2,3467(b/d)^{0,5403}]$, аппроксимирующее зависимости емкости от относительного смещения электродов в диапазоне $0 \leq |x|/b \leq 1$ и $b/d \geq 1$ с погрешностью не более 10%. Результаты расчета емкости от смещения электродов с использованием формулы (17) приведены на рис. 6 (штриховые линии).

Заключение

В работе проведено сравнительное исследование пределов применимости различных подходов, используемых для расчета емкостей плоских конденсаторов, содержащих два одинаковых прямоугольных или круглых параллельных электрода. Приведены результаты расчета погрешности в оценках емкости конденсаторов с изменяющимся межэлектродным зазором и перекрытием электродов при использовании различных подходов.

Показано, что краевые эффекты увеличивают емкость конденсатора. При этом роль краевых эффектов с ростом отношения b/d уменьшается. В результате, для конденсаторов (как с прямоугольными, так и с круглыми электродами) погрешность расчетов емкости, проводимых в рамках модели идеального плоского конденсатора, не превышает 10%, только если значение $b/d > 16,5$, и 5%, если $b/d \geq 40$.

Для конденсаторов с изменяющейся площадью перекрытия электродов предложено аналитическое выражение, позволяющее рассчитывать значения емкостей с учетом краевых эффектов в диапазоне $0 \leq |x|/b \leq 1$ при $d/b \leq 1$ с погрешностью менее 10 %.

Использование приведенных выражений позволит с большей достоверностью оценивать емкости между элементами конструкции МЭМС, проводить оптимизацию и повышать качество системы в целом.

Данная работа выполнена в рамках реализации Федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009—2013 гг. (проект НК-392П/16).

Список литературы

1. Вернер В. Д., Мальцев П. П., Резнев А. А., Сауров А. Н., Чаплыгин Ю. А. Современные тенденции развития микро- и наносистемной техники // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 8. С. 2—6.
2. Амеличев В. В., Вернер В. Д., Ильков А. В. МЭМС-микрофон. Выбор материалов, конструкции и технологии. Ч. I. Электромеханический чувствительный элемент // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 2. С. 53—62.
3. Амеличев В. В., Вернер В. Д., Ильков А. В. МЭМС-микрофон. Выбор материалов, конструкции и технологии. Ч. II. Влияние полости под диафрагмой на характеристики микрофона // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 3. С. 27—35.

4. Драгунов В. П. Влияние формы упругого элемента на характеристики микромеханических систем // Микросистемная техника. 2004. № 1. С. 20—26.

5. Драгунов В. П. Нелинейность упругих элементов микромеханических систем // Микросистемная техника. 2004. № 5. С. 7—13.

6. Ефремов Г. И., Мухуров Н. И. Параметры трехэлектродных электростатических микроактюаторов // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 9. С. 40—44.

7. Бабаевский П. Г., Резниченко Г. М., Жуков А. А., Жукова С. А., Гринькин Е. А. Электромеханические преобразователи сенсорных микро- и наносистем: физические основы и масштабные эффекты. Ч. I. Чувствительные механические элементы и актюаторы // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 11. С. 32—44.

8. Алексенко А. Г., Балан Н. Н. Анализ эффекта схлопывания электродов электростатических актюаторов (PULL-IN-INSTABILITY) в MEMS- и NEMS-устройствах // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 7. С. 31—41.

9. Иоссель Ю. Я., Кочанов Э. С., Струнский М. Г. Расчет электрической емкости, 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоиздат, 1981. 288 с.

10. Palmer H. V. Capacitance of a parallel-plate capacitor by the Schwartz-Christoffel transformation // Transaction on AIEE. 1937. V. 56, N 3. P. 363—366.

11. Драгунов В. П., Остертак Д. И. Расчет латеральной составляющей электростатической силы в МЭМС // Научный вестник НГТУ. 2009. Т. 34, № 1. С. 229—232.

12. Драгунов В. П., Колчужин В. А., Остертак Д. И. Влияние краевых эффектов на электрическую емкость в МЭМС // Доклады АН ВШ РФ. 2009. Т. 13, № 2. С. 97—105.

УДК 531.383-11:531.714.7

А. М. Боронахин, канд. техн. наук, доц.,
зам. зав. каф.,
e-mail: boronachin@mail.ru,
П. А. Иванов, аспирант, инженер,
e-mail: ivanov_etu@mail.ru,
И. Л. Суков, инженер,
e-mail: sukovfam@mail.ru,
СПбГЭТУ "ЛЭТИ"

КОРРЕКЦИЯ ВЛИЯНИЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРЕНИЯ НА ПОКАЗАНИЯ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

Предложена математическая модель погрешностей, описывающая влияние линейного ускорения на показания микроскопов, и алгоритм его коррекции. Объектом испытаний выступал инерциальный измерительный модуль на базе чувствительных элементов производства компании Analog Devices. Исследование проводилось на малогабаритном двухосном стенде, разработанном кафедрой "Лазерных измерительных и навигационных систем" СПбГЭТУ "ЛЭТИ".

Ключевые слова: инерциальная навигация, математическая модель погрешностей, микромеханический гироскоп, малогабаритный двухосный испытательный стенд

Введение

Согласно принципу действия микромеханического гироскопа (ММГ) LL-типа, датчик имеет три оси: измерительную ось и оси первичных и вторичных ко-

лебаний. Чувствительный элемент такого гироскопа представляет собой инерционную массу, скрепленную с основанием через упругие элементы подвеса и совершающую колебания с большой частотой вдоль оси первичных колебаний (режим движения). При появлении проекции угловой скорости на измерительную ось за счет действия на инерционную массу силы Кориолиса возникают колебания по оси вторичных колебаний (режим чувствительности). Таким образом, ММГ по сути своей является датчиком линейного ускорения с измерительной осью, совпадающей с осью вторичных колебаний, а угловая скорость измеряется косвенно. Можно предположить, что проекция линейного ускорения на ось вторичных колебаний оказывает влияние на показания гироскопа [1].

Таким образом, необходимо учитывать влияние линейного ускорения на показания ММГ (при их калибровке и эксплуатации) с использованием показаний блока микромеханических акселерометров (ММА), которые обычно входят в состав инерциального измерительного модуля (ИИМ).

Математическая модель, описывающая влияние линейного ускорения на показания триады ММГ

Необходимо реализовать позиционирование в поле силы тяжести Земли вокруг каждой из осей приборной системы координат $oxuz$ с шагом 5° . Начальные положения и задаваемые углы разворота θ показаны на рис. 1.

Как пример, на рис. 2 представлена зависимость показаний x -гироскопа от угла разворота: линией 1—

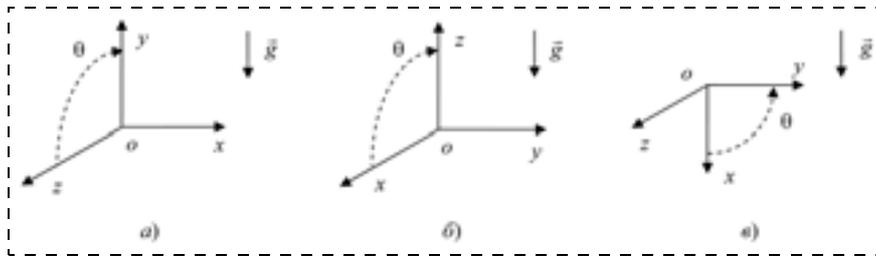


Рис. 1. Начальные положения и задаваемые углы разворота при позиционировании: а — вокруг оси x ; б — вокруг оси y ; в — вокруг оси z

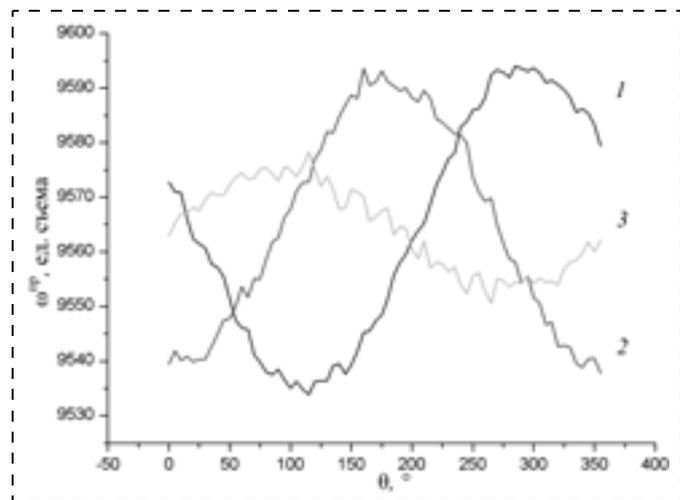


Рис. 2. Показания x -гироскопа при позиционировании

при позиционировании вокруг оси x , линией 2 — при позиционировании вокруг оси y и линией 3 — при позиционировании вокруг оси z .

Экспериментально было установлено, что ось вторичных колебаний внутри ММГ не совпадает с осями корпуса платы (оси могут быть развернуты на значительные углы).

Ось вторичных колебаний необходимо соотнести с той осью приборной системы координат, для которой углы отклонения оси вторичных колебаний от выбранной оси приборной системы координат будут минимальными. Рассмотрим, например, случай, представленный на рис. 2. Из графиков зависимости приборных показаний $\omega^{пр}$ от угла разворота θ видно, что при вращении вокруг оси z приборной системы координат показания x -гироскопа имеют наименьшую амплитуду. Это значит, что положение оси вторичных колебаний x -гироскопа необходимо рассматривать относительно оси z приборной системы координат. Аналогично для y -гироскопа была выбрана ось x , а для z -гироскопа — ось y .

Взаиморасположение оси вторичных колебаний и соответствующей ей оси приборной системы координат было представлено для x -гироскопа

как разворот на два плоских угла. Развороты на эти углы для триады ММГ представлены на рис. 3.

Необходимо разработать математическую модель влияния линейного ускорения на показания триады ММГ, которая представляла бы собой дополнительное слагаемое в математической модели показаний датчиков и имела бы следующий вид:

$$\begin{bmatrix} \omega_x^g \\ \omega_y^g \\ \omega_z^g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_x^g & 0 & 0 \\ 0 & K_y^g & 0 \\ 0 & 0 & K_z^g \end{bmatrix} \cdot [A] \cdot \begin{bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $\omega_x^g, \omega_y^g, \omega_z^g$ — вклад линейного ускорения в показания ММГ (ед. съема);

K_x^g, K_y^g, K_z^g — коэффициенты пропорциональности (ед. съема/(м/с²));

W_x, W_y, W_z — проекции линейного ускорения на оси приборной системы координат (м/с²);

$$[A] = \begin{bmatrix} -\sin\beta_x^g \cdot \cos\alpha_x^g & \sin\alpha_x^g \cdot \cos\beta_x^g & \cos\alpha_x^g \cdot \cos\beta_x^g \\ \cos\alpha_y^g \cdot \cos\beta_y^g & -\sin\beta_y^g \cdot \cos\alpha_y^g & \sin\alpha_y^g \cdot \cos\beta_y^g \\ \sin\alpha_z^g \cdot \cos\beta_z^g & \cos\alpha_z^g \cdot \cos\beta_z^g & -\sin\beta_z^g \cdot \cos\alpha_z^g \end{bmatrix} -$$

матрица перехода от осей приборной системы координат к осям вторичных колебаний триады ММГ, которая составляется с учетом их (осей) взаимного расположения (рис. 3);

$\alpha_x^g, \beta_x^g, \alpha_y^g, \beta_y^g, \alpha_z^g, \beta_z^g$ — углы матрицы перехода (рад.).



Рис. 3. Положение осей вторичных колебаний триады ММГ

Оценка углов в матрице перехода проводится по следующим формулам:

а) при позиционировании вокруг оси x :

$$\beta_z = \text{arcctg} \left(-\frac{\omega_z^g|_0 - \omega_z^g|_\pi}{\omega_z^g|_{\pi/2} - \omega_z^g|_{3\pi/2}} \right),$$

$$\alpha_x = \text{arcctg} \left(\frac{\omega_x^g|_{\pi/2} - \omega_x^g|_{3\pi/2}}{\omega_x^g|_0 - \omega_x^g|_\pi} \right);$$

б) при позиционировании вокруг оси y :

$$\beta_x = \text{arcctg} \left(-\frac{\omega_x^g|_0 - \omega_x^g|_\pi}{\omega_x^g|_{\pi/2} - \omega_x^g|_{3\pi/2}} \right),$$

$$\alpha_y = \text{arcctg} \left(\frac{\omega_y^g|_{\pi/2} - \omega_y^g|_{3\pi/2}}{\omega_y^g|_0 - \omega_y^g|_\pi} \right);$$

в) при позиционировании вокруг оси z :

$$\beta_y = \text{arcctg} \left(\frac{\omega_y^g|_0 - \omega_y^g|_\pi}{\omega_y^g|_{\pi/2} - \omega_y^g|_{3\pi/2}} \right),$$

$$\alpha_z = \text{arcctg} \left(-\frac{\omega_z^g|_{\pi/2} - \omega_z^g|_{3\pi/2}}{\omega_z^g|_0 - \omega_z^g|_\pi} \right).$$

Далее, для определения коэффициентов пропорциональности в математической модели (1) необходимо построить зависимость показаний ММГ от проекций линейного ускорения на ось вторичных колебаний с учетом матрицы перехода [A].

Зависимость показаний x -гироскопа от проекции линейного ускорения представлена на рис. 4 (см. третью сторону обложки): черной линией — при позиционировании вокруг оси x , красной — при позиционировании вокруг оси y .

Аппроксимируя каждую из линий полиномом первого порядка и беря среднее между угловыми коэффициентами полученных прямых, найдем оценку коэффициента пропорциональности в математической модели для x -гироскопа. Аналогично оцениваются остальные коэффициенты пропорциональности.

Результаты оценки параметров математической модели влияния линейного ускорения на показания ММГ

Результаты оценки углов матрицы перехода:

$$\alpha_x^g, \text{ } ^\circ \dots -21,25$$

$$\beta_x^g, \text{ } ^\circ \dots -2,72$$

$$\alpha_y^g, \text{ } ^\circ \dots 13,66$$

$$\beta_y^g, \text{ } ^\circ \dots -4,78$$

$$\alpha_z^g, \text{ } ^\circ \dots 1,51$$

$$\beta_z^g, \text{ } ^\circ \dots 0,37$$

Результаты оценки коэффициентов пропорциональности:

$$K_x^g, \text{ ед. съема/м/с}^2 \text{ (} ^\circ\text{/с/(м/с}^2\text{))} \dots -2,95 \text{ (0,06)}$$

$$K_y^g, \text{ ед. съема/м/с}^2 \text{ (} ^\circ\text{/с/(м/с}^2\text{))} \dots -1,23 \text{ (0,03)}$$

$$K_z^g, \text{ ед. съема/м/с}^2 \text{ (} ^\circ\text{/с/(м/с}^2\text{))} \dots -2,42 \text{ (0,05)}$$

Коррекция влияния линейного ускорения на показания ММГ

Математическая модель показаний блока ММА:

$$\begin{bmatrix} W_x^{\text{пр}} \\ W_y^{\text{пр}} \\ W_z^{\text{пр}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 \\ 0 & 0 & K_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\alpha_y & \beta_z \\ \alpha_x & 1 & -\gamma_z \\ -\beta_x & \gamma_y & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_{x0} \\ W_{y0} \\ W_{z0} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $W_x^{\text{пр}}$, $W_y^{\text{пр}}$, $W_z^{\text{пр}}$ — приборные показания акселерометров (ед. съема); W_x , W_y , W_z — истинное значение проекции линейного ускорения (м/с²); W_{x0} , W_{y0} , W_{z0} — нулевой сигнал акселерометров (ед. съема); K_x , K_y , K_z — масштабный коэффициент акселерометров (ед. съема/(м/с²)); α_x , α_y , β_x , β_z , γ_y , γ_z — углы неортогональностей измерительных осей акселерометров (рад.).

По показаниям блока акселерометров (2) можно оценить проекции линейного ускорения на оси приборной системы координат следующим образом:

$$\begin{bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\alpha_y & \beta_z \\ \alpha_x & 1 & -\gamma_z \\ -\beta_x & \gamma_y & 1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 \\ 0 & 0 & K_z \end{bmatrix}^{-1} \times \\ \times \left\{ \begin{bmatrix} W_x^{\text{пр}} \\ W_y^{\text{пр}} \\ W_z^{\text{пр}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} W_{x0} \\ W_{y0} \\ W_{z0} \end{bmatrix} \right\}. \quad (3)$$

Погрешность такой оценки ΔW составляет порядка $\pm 0,01$ м/с², а погрешность оценки влияния линейного ускорения на показания ММГ $\Delta \omega^2 \leq \pm 67 \cdot 10^{-4}$ °/с.

Алгоритм компенсации влияния линейного ускорения на показания ММГ можно изобразить в виде блок-схемы, представленной на рис. 5.

В каждый момент времени по показаниям ММА необходимо определять проекции линейного ускорения на оси приборной системы координат, а затем, используя полученный вектор-столбец ускорений и предложенную математическую модель влияния линейного ускорения (1), рассчитывать поправки к показаниям ММГ. На рис. 6 представлен результат такой коррекции для одного ММГ при вращении в поле силы тяжести с угловой скоростью 75 °/с в течение 5 с (темная кривая — до коррекции, светлая — после коррекции).

Далее, используя стандартную математическую модель показаний ММГ и общепринятую методику

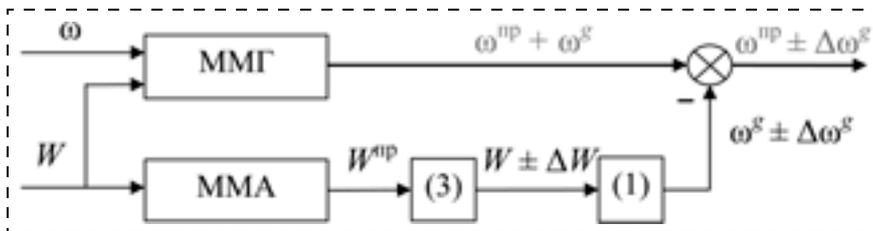


Рис. 5. Блок-схема алгоритма компенсации влияния линейного ускорения на показания ММГ

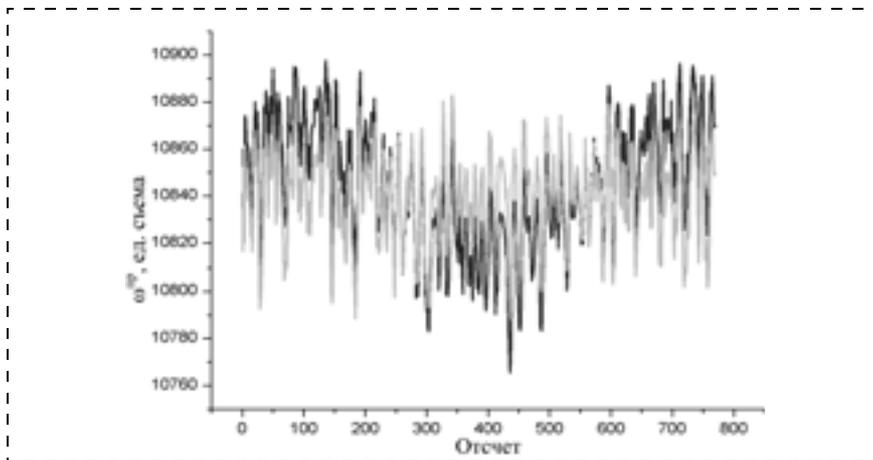


Рис. 6. Результат коррекции влияния линейного ускорения на показания ММГ

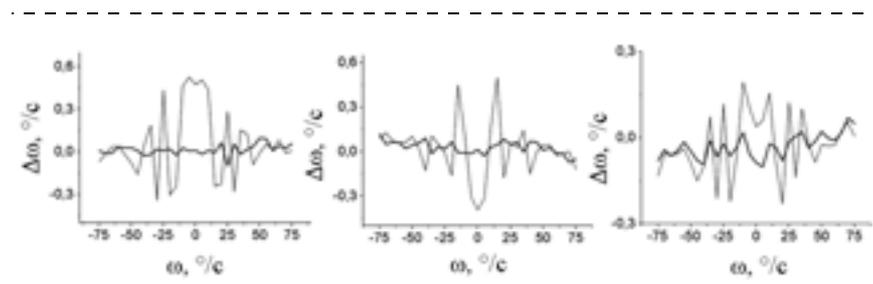


Рис. 7. Погрешность математической модели x-, y-, z-гироскопов

испытаний триады гироскопов [8], необходимо оценить все калибровочные параметры.

Погрешности математической модели для x-, y-, z-гироскопов при вращении вокруг одноименных осей представлены на рис. 7 (светлая линия — без учета влияния линейного ускорения, темная — с учетом). При этом погрешность модели во втором случае не превышает $\pm 0,08$ °/с, тогда как в первом — погрешность составляла порядка ± 1 °/с.

Заключение

В статье рассмотрено влияние линейного ускорения на показания ММГ LL-типа. В результате чего:

- предложена математическая модель, которая достаточно полно отражает влияние линейного ускорения на показания ММГ;
- разработана методика оценки параметров этой модели;
- представлен алгоритм коррекции влияния линейного ускорения на показания ММГ по данным с MMA.

Все это позволяет реализовать коррекцию показаний ММГ (как при эксплуатации, так и при испытаниях) с учетом влияния на соответствующий датчик линейного ускорения, используя при этом показания MMA, которые, как правило, входят в состав ИИМ. Для рассматриваемых ММГ производства компании Analog Devices вклад линейного ускорения в показания составил в среднем $0,46$ (°/с)/g (хотя в паспортных данных эта величина составляет $0,2$ (°/с)/g). Кроме того, ось вторичных колебаний ММГ может быть развернута относительно осей, связанных с корпусом датчика (на которые ориентируется разработчик при установке датчика на плату ИИМ), на достаточно большие углы (до $\pm 20^\circ$). Проведенное исследование позволило уточнить математическую модель показаний ММГ и алгоритм оценки входящих в нее параметров. При этом погрешность уточненной модели после проведения предложенной коррекции на порядок ниже погрешности общепринятой (IEEE) и не превышает $0,08$ °/с.

Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009—2013 годы, проект № П2041.

Список литературы

1. **Боронахин А. М., Иванов П. А., Суворов И. Л.** Исследование погрешностей триады микромеханических гироскопов с использованием малогабаритного двухосного стенда // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 1. С. 35—41.
2. **Боронахин А. М., Лукьянов Д. П., Филатов Ю. В.** Оптические и микромеханические инерциальные приборы. СПб.: Элмор, 2007. 400 с.
3. **Голован А. А., Парусников Н. А.** Математические основы навигационных систем. Ч. I. Математические модели инерциальной навигации. М.: Изд-во МГУ, 2007. 110 с.
4. **Голован А. А., Парусников Н. А.** Математические основы навигационных систем. Ч. II. Приложения методов оптимального оценивания к задачам навигации. М.: Изд-во МГУ, 2008. 128 с.
5. **Анучин О. Н., Емельянец Г. И.** Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов / Под общей ред. В. Г. Пешехонова. Изд. 2-е, перераб. и доп. СПб.: ГНЦ РФ — ЦНИИ "Электроприбор", 2003. 390 с.
6. **Степанов О. А.** Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч. 1. Введение в теорию оценивания. СПб.: ГНЦ РФ — ЦНИИ "Электроприбор", 2009. 496 с.
7. **Распопов В. Я.** Микромеханические приборы: учебное пособие. М.: Машиностроение, 2007. 400 с.
8. **P952/D25 (June 1997).** IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-axis heterodyne Fiber Optic Gyros.

В. П. Михайлов, д-р техн. наук, проф.,
А. М. Базиненков, аспирант,
А. С. Кузнецов, студент,
И. К. Зобов, студент,
К. Г. Шаков, студент,
 МГТУ им. Н. Э. Баумана,
 e-mail: mikhailov@bmstu.ru

СИСТЕМЫ РЕОЛОГИЧЕСКОГО ТИПА ДЛЯ МИКРО- И НАНОПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ И ВИБРОИЗОЛЯЦИИ

Современное прецизионное оборудование для электронных и машиностроительных технологий использует многокоординатные системы для сверхточного позиционирования. Представлены анализ, конструкции и параметры новых магнито-реологических (МР), электро-реологических (ЭР) и магнито-реологических эластомерных (МЭ) позиционирующих устройств. Комбинация МР или ЭР замкнутого управления, упругих направляющих и тонкостенных герметизирующих элементов обеспечивает малую погрешность линейного (≤ 100 нм) и углового ($\leq 0,2''$) позиционирования, малую постоянную времени (≤ 200 мс), диапазон линейных перемещений по трем координатам X, Y, Z (1...10) мм и передаваемое усилие (1...1000) Н.

Ключевые слова: позиционирующие и виброизолирующие системы, магнито- и электро-реологические жидкости и эластомеры, вязкость

Анализ оборудования, использующего системы для микро- и нанопозиционирования и виброизоляции

В настоящее время прецизионное технологическое и исследовательское оборудование [1...5] предъявляет очень жесткие требования к системам перемещения и виброизоляции. К такому оборудованию можно отнести сканирующие зондовые микроскопы (СЗМ) с погрешностью позиционирования зонда относительно образца на атомарном уровне (менее 0,1 нм). В оборудовании для микролитографии, в частности для рентгенолитографии, погрешность совмещения подложки с рентгеношаблоном составляет менее 20 нм. К сверхпрецизионному оборудованию можно отнести также установки для юстировки оптоволоконных устройств. При этом требуется обеспечить юстировочное перемещение оптоволоконна относительно источника излучения, например лазера, по трем координатам с точностью порядка 20 нм. К оборудованию, в котором используются системы микро-, наноперемещений и виброизоляции, относятся сверхбольшие адаптивные телескопы, например телескопы КЕСК, АСТ-25, OWL [3]. Кроме высокой точности юстировки и виброизоляции система должна обеспечивать нагрузочную способность до 1000 Н и быстроедействие на уровне 5...200 мс.

В последнее время проводятся исследования систем микро-, наноперемещений и виброизоляции для сверхпрецизионной механической обработки деталей [7]. Сейчас субмикрометровая точность механообработки достигается, как правило, по одной координате. Можно, например, обработать лазерное зеркало на станке алмазного точения с шероховатостью в единицы нанометров, но изготовить на его поверхности двумерный рисунок размером в несколько микрометров на том же станке нельзя. Однако в настоящее время рядом фирм, выпускающих СЗМ, реализуется возможность проведения операций силовой литографии, т. е. кантилевер может сканировать некоторую область поверхности по определенной кривой с приложением к нему соответствующей силы. При этом современные СЗМ имеют поле сканирования до 100 мкм и больше и поэтому могут быть использованы не только для перемещения зонда, сканирующего поверхность, но и для позиционирования инструмента, модифицирующего ее. Усилие, которое развивает пьезосканер, достаточно, чтобы создать необходимое для разрушения материала давление. Таким образом, СЗМ — это готовая платформа для механической нанообработки материалов [7].

Для реализации микро- и нанопозиционирования инструмента относительно изделия необходимо обеспечить эффективную виброизоляцию оборудования. В настоящее время в основном используется пассивная виброизоляция. Как правило, это массивные фундаменты или однокаскадные и двухкаскадные амортизаторы-пружины с собственной частотой около 10 Гц. Такие системы наиболее надежны. Однако получение достаточно низких собственных частот (до 0,5...1 Гц) с помощью чисто пассивных средств виброзащиты достаточно затруднено из-за недопустимого увеличения габаритных размеров и массы виброизолирующей системы.

Вторым вариантом систем виброзащиты являются полуактивные параметрически управляемые системы, которые осуществляют демпфирование за счет настройки вязкоупругих свойств виброизолирующей системы на определенный частотный диапазон вибраций. Как правило, это гидравлические, пневматические и пьезоэлектрические опоры. Жесткость этих опор может изменяться в зависимости от внешних условий. Такие системы в настоящее время используют в сканирующих зондовых микроскопах. Активные виброизолирующие системы способны кроме изменения жесткости корректировать перемещение и позиционирование исполнительного механизма в зависимости от внешних условий и реализуют, таким образом, адаптивное управление.

Выбор варианта позиционирующей и виброизолирующей системы

Проведенные исследования и замеры вибрации межэтажных перекрытий [6] показывают, что колебания, передаваемые на основание, имеют, как правило, весьма широкий спектр частот. Наиболее интенсивные колебания перекрытия в цехах машиностроительных предприятий происходят на частотах 4...30 Гц. При этом амплитуда колебаний в верти-

кальном направлении составляет 2...3 мкм, в горизонтальном — 1,8...2 мкм.

Рассмотренные примеры оборудования позволяют сформулировать ряд принципиально новых требований к перспективным нанопозиционирующим и демпфирующим системам, а именно: сочетание достаточной величины перемещения с высокой точностью позиционирования, быстродействием и нагрузочной способностью. Кроме того, необходимо объединение функций юстировки и виброизоляции в одном модуле. Эти требования можно сформулировать следующим образом:

- диапазон линейных перемещений — 0,1...10 мм;
- погрешность позиционирования — 0,1...50 нм;
- быстродействие — 1...200 мс;
- виброизоляция оборудования от внешних возмущающих воздействий на частотах до 200 Гц;
- нагрузочная способность — 1...1000 Н;
- коэффициент передачи амплитуды колебаний — 0,01...0,001.

В прецизионном машиностроении пружинные амортизаторы и резинометаллические фундаменты уже при амплитудах колебания межэтажных перекрытий порядка 0,3 мкм не обеспечивают необходимого уменьшения колебаний, что требует применения специальных массивных виброгасящих систем стационарного типа. Однако применение подобных стационарных систем, как и фундаментов, оказывается неприемлемым при необходимости монтажа прецизионного оборудования в непосредственной близости от технологических машин на межэтажных перекрытиях производственных корпусов.

Пьезоэлектрические опоры имеют высокую собственную частоту 100...200 Гц, однако обладают малой нагрузочной способностью и небольшим диапазоном перемещений. Пневматические виброизолирующие опоры отвечают большинству требований, предъявляемых к средствам защиты прецизионного оборудования, и обладают такими достоинствами, как низкая жесткость, а значит, и низкая собственная частота при высокой несущей способности, малые масса и габаритные размеры. Компенсируя стационарные низкочастотные возмущения объекта, пневмоопора обеспечивает высокую эффективность виброизоляции. Основным недостатком пневмоопоры является невозможность ее использования в качестве активной системы виброизоляции, что обусловливается высокой сжимаемостью воздуха и большим временем переходного процесса.

Вследствие этого для прецизионного оборудования все более широко применяются опоры, имеющие замкнутую систему автоматического регулирования [6], способную обеспечить заданное положение объекта с высокой точностью. К ним можно отнести опоры, где в качестве рабочего тела используются магнито- или электрореологические жидкости, магнитоуправляемые эластомеры и т. д. Они в основном применяются для защиты от низкочастотных колебаний.

Разработка устройств реологического типа для нанопозиционирования и активной виброизоляции

Как было сказано ранее, для некоторых объектов невозможно разделить функции виброизоляции и

позиционирования. Эти две системы тесно связаны между собой и в совокупности представляют собой систему активной виброизоляции. Такими системами являются разработанные на кафедре "Электронные технологии в машиностроении" МГТУ им. Н. Э. Баумана системы на основе магнито- и электрореологических (МР и ЭР) жидкостей и магнито-реологических эластомеров (МЭ).

В качестве вязких сред в мехатронных устройствах используют дисперсные структуры — суспензии на основе жидкостей и дисперсных фаз с развитой поверхностью, коллоидные растворы с частицами магнитной фазы однодоменного размера, имеющие постоянный магнитный момент, чистые жидкости [4], а также высокомолекулярные вещества (полимеры, органические жидкости и др.) [9]. Для разработанных МР устройств использовалась сертифицированная МР суспензия на основе полиэтилсилоксановой жидкости и карбонильного железа с размером частиц 1...10 мкм. Для ЭР устройств в качестве рабочей среды применялась ЭР суспензия на основе частиц диатомита (SiO_2) микрометровых размеров.

МЭ является сравнительно новым материалом, синтезированным в последнее время и представляющим собой композицию на основе высокоэластичной полимерной матрицы и магнитного наполнителя [5]. Особенности состава данного композиционного материала позволяют проявить комплекс новых, ранее неизвестных свойств: под действием магнитного поля материал способен значительно деформироваться и изменять свои упругие свойства, проявлять эффект магнитострикции и эффект памяти формы.

Этот тип материала относится к разряду так называемых *умных материалов (smart materials)*. МЭ получают диспергированием магнитного порошка в жидком силиконовом каучуке с последующей полимеризацией композиции в форме. В качестве магнитных наполнителей используют порошки магнетита с размером 0,5 мкм и железа 2...5 мкм. Для улучшения совместимости с органическим связующим порошки модифицируют поверхностно-активными веществами (ПАВ) и кремнийорганическими соединениями. С помощью магнитного поля можно управлять удлинением образцов из МЭ и использовать этот эффект для создания прецизионных мехатронных механизмов перемещения и активных демпферов.

Разработанные устройства микро- и нанопозиционирования на основе МР жидкости можно использовать в вакуумной или другой чистой технологической среде [1]. На рис. 1 приведена схема однокоординатного магнито-реологического привода с диапазоном перемещения по одной координате до 300 мм. В качестве рабочей среды в модуле используется МР жидкость на основе микрочастиц карбонильного железа и полиэтилсилоксановой жидкости. Основными элементами привода являются МР распределитель 4, насос 5 и тонкостенные резиновые оболочки (ТРО), герметизирующие направляющие 2 и два гидроцилиндра 3. МР распределитель 4 состоит из четырех МР дросселей, содержащих электромагнитные катушки k_1 — k_4 и магнитопроводы с рабочими зазорами, через которые протекает рабочая среда. Перемещае-

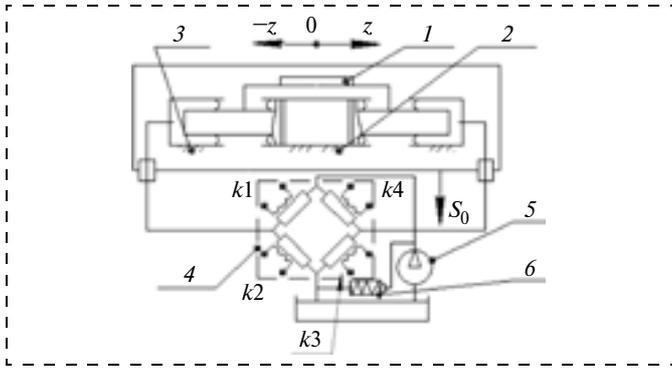


Рис. 1. Схема однокоординатного МР привода с большим диапазоном перемещения

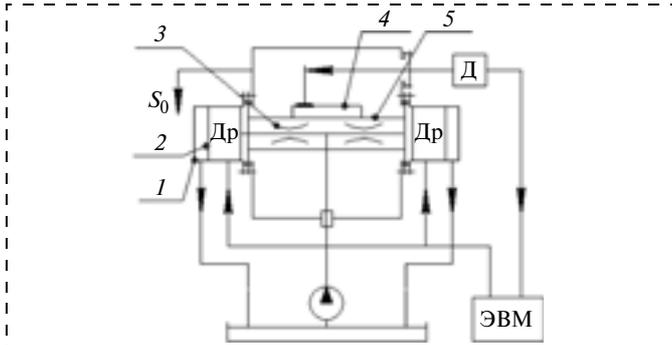


Рис. 2. Схема однокоординатного МР привода для микроперемещений

мый объект 1, направляющие 2 со штоком и гидроцилиндры 3 находятся в вакуумной камере, остальные элементы — в атмосфере. В случае полного закрытия МР дросселей рабочая среда перетекает в сливной бак через предохранительный клапан 6.

Привод работает следующим образом. Рабочая среда с помощью насоса 5 подается из сливного бака через МР распределитель в гидроцилиндры 3. Изменяя электрический ток в катушках k_1 — k_4 , можно регулировать напряженность магнитного поля в рабочих зазорах МР дросселей и, соответственно, динамическую вязкость рабочей среды, протекающей через них. Таким образом, можно менять давление в гидроцилиндрах 3 и осевую силу, действующую на шток. Поступательное перемещение по оси Z передается от гидроцилиндров 3 через шток к каретке координатного стола, на которой закреплен перемещаемый объект 1. В процессе перемещения штока по оси Z в направляющих 2 ТРО перекачивается со штока на гидроцилиндры 3 и обратно, обеспечивая полную герметичность соединения. Для микроперемещений в небольшом диапазоне (до 1 мм) с нанометровой точностью и миллисекундным быстродействием объектов в сверхвысоковакуумном исследовательском и технологическом оборудовании, а также для юстировки инерционных объектов может быть использован однокоординатный МР привод реологического типа, схема которого приведена на рис. 2. Привод состоит из двух позиционирующих узлов 1 с МР дросселями 2 (Др), капиллярных дросселей 3, каретки 4, подвижного штока 5, датчика перемещения (Д). Узлы 1 герметизированы с помощью плоских металлических мембран, которые также играют роль упругих направляющих.

Привод работает следующим образом. Рабочая среда — МР жидкость — поступает от насоса через капиллярные дроссели 3 и МР дроссели 2 в узлы 1. Подавая сигналы в электромагнитные катушки МР дросселей 2 от управляющей ЭВМ, можно регулировать перепад давлений рабочей среды в позиционирующих узлах 1 и, соответственно, перемещение штока 5 вдоль оси, которое измеряется с помощью датчика Д.

Трехкоординатный юстировочный МР привод с диапазоном перемещений до 500 мкм (рис. 3) содержит перемещаемую каретку 1, основание 2, сильфон 3, МР дроссели 4, перемещаемый объект 5, опору 6, упругий шарнир 7, датчик перемещения 8. Принцип работы привода следующий. Рабочая МР жидкость подается насосом в гидростатическую опору 6 через МР дроссели 4. Каретка 1 перемещается относительно основания 2 по трем координатам X, Y, Z. Герметизирующим элементом является сильфон 3 из коррозионно-стойкой стали. Перемещаемый объект 5 закреплен на упругом шарнире 7 и совершает линейное перемещение по оси Z и поворот вокруг осей X, Y. Линейное перемещение измеряется с помощью датчика 8 (датчики угловых перемещений не показаны). Сигнал с датчика 8 поступает через АЦП в управляющую ЭВМ. Сигналы управления подаются через ЦАП на МР дроссели 4.

Трехкоординатный МР привод (рис. 4) с увеличенным диапазоном юстировки (до 10 мм) содержит три пары гидроцилиндров 4, упругий узел подвески 2,

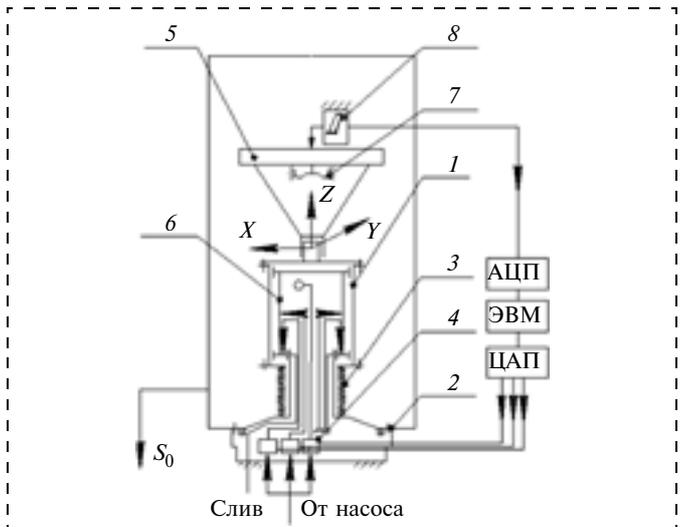


Рис. 3. Схема трехкоординатного юстировочного МР привода

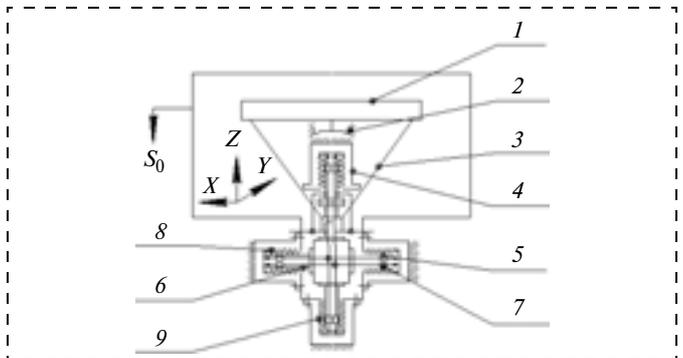


Рис. 4. Схема трехкоординатного МР привода с увеличенным диапазоном юстировки

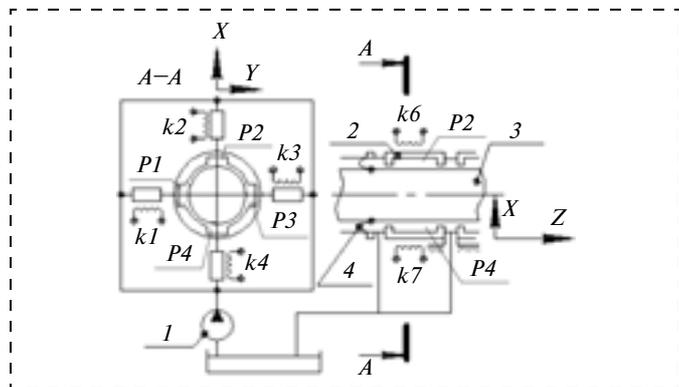


Рис. 5. Схема пятикоординатного МР привода

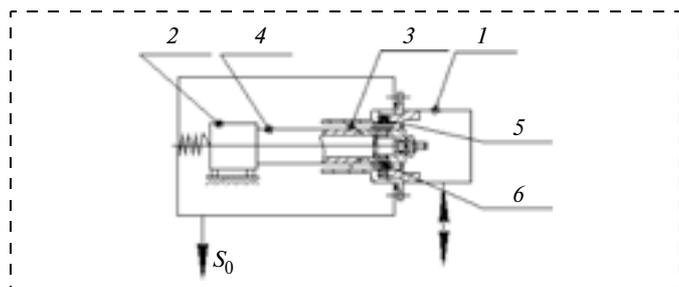


Рис. 6. Схема однокоординатного привода с герметизатором на основе тонкостенной резиновой оболочки

перемещаемый объект 1, тяги 3 для передачи перемещений от МР привода к объекту, гидравлическую насосную станцию (на схеме не показана), входные МР дроссели 5, подвижный корпус 6, выходные МР дроссели 7, сильфоны 8, 9. МР привод работает следующим образом. Рабочая жидкость подается с помощью гидравлической насосной станции в три пары гидроцилиндров 4 через входные МР дроссели 5 и далее перемещается в сливной бак через выходные МР дроссели 7. При подаче управляющих сигналов на входные и выходные МР дроссели меняется динамическая вязкость рабочей жидкости и создается перепад давлений в каждой паре гидроцилиндров 4. Под действием перепадов давления возникают силы, перемещающие объект 1 с помощью тяг 3 по линейной координате Z и двум угловым координатам вокруг осей X и Y. Перемещаемый объект 1 закреплен на упругом узле подвески 2, имеющем три степени подвижности: линейную Z и две угловых — вокруг осей X и Y.

Пятикоординатный привод (рис. 5) позволяет перемещать объекты по одной длинноходовой координате Z (в диапазоне до 300 мм), двум координатам X и Y (в диапазоне до 200 мкм) и двум угловым координатам вокруг осей X и Y. Привод содержит гидравлический насос 1, неподвижный корпус 2 и подвижный цилиндрический шток 3, герметизированный с двух сторон с помощью ТРО 4. Модуль представляет собой гидростатическую направляющую цилиндрического типа с четырьмя камерами высокого давления в корпусе 2, образующими опорный элемент направляющей. Для обеспечения устойчивости подвижного штока направляющая содержит два опорных элемента, расположенных вдоль оси Z. На входе камер высокого давления расположены МР

дроссели с электромагнитными катушками k_1-k_4 , на выходе — МР дроссели с катушками k_6, k_7 (k_5, k_8 — не показаны).

Модуль работает следующим образом. Рабочая среда — МР жидкость — подается насосом 1 из сливного бака через входные МР дроссели с катушками k_1-k_4 в камеры высокого давления. Протекая через радиальные рабочие зазоры между подвижным цилиндрическим штоком и магнитопроводами выходных МР дросселей с катушками k_5-k_8 , рабочая жидкость попадает в сливной бак. Изменяя электрический ток в катушках МР дросселей, можно регулировать давление в камерах модуля. При этом подвижный шток "всплывает" в корпусе 2 и может перемещаться вдоль осей X и Y, совершать поворот вокруг осей X и Y, а также с помощью дополнительного длинноходового привода (на схеме не показан) перемещаться вдоль оси Z.

На рис. 6 показан однокоординатный привод гидравлического типа с использованием МР или ЭР жидкости. Привод содержит гидроцилиндр 1, каретку 2, герметизатор — тонкостенную резиновую оболочку 3, закрепленную на гидроцилиндре 1 и штоке 4 с помощью резиновых уплотнений 5 и металлических колец 6. Привод работает следующим образом. В гидроцилиндр 1 подается МР жидкость, под действием которой возникает осевая сила, действующая на шток 4 и перемещающая каретку 2. При возвратно-поступательном движении штока 4 ТРО 3 перекачивается со штока 4 на гидроцилиндр 1 и обратно, создавая только упругие силы сопротивления. В этом случае полностью отсутствуют силы трения скольжения штока и гидроцилиндра, что обеспечивает высокую точность и плавность перемещения.

Комплекс проведенных исследовательских и конструкторских работ позволил разработать схемы виброизолирующих и позиционирующих систем на основе активных МЭ демпферов (рис. 7, 8). Данные

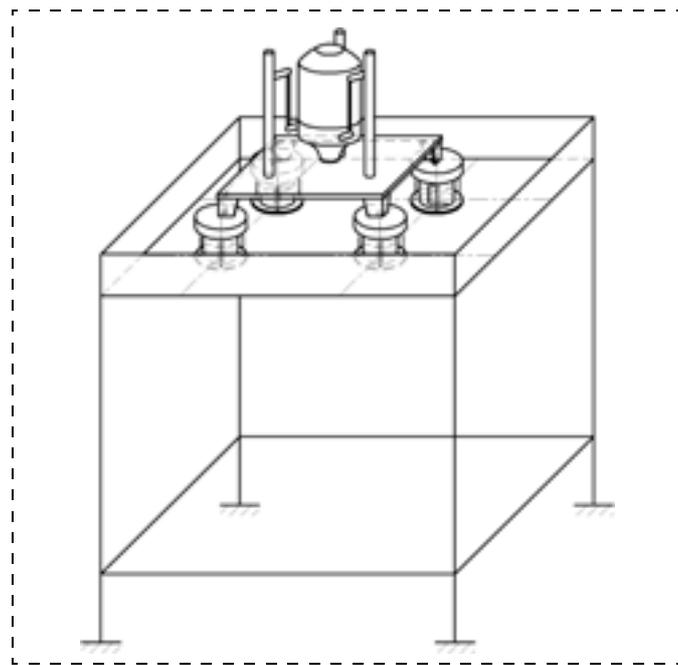


Рис. 7. Виброизолирующая система на основе однокоординатных МЭ демпферов

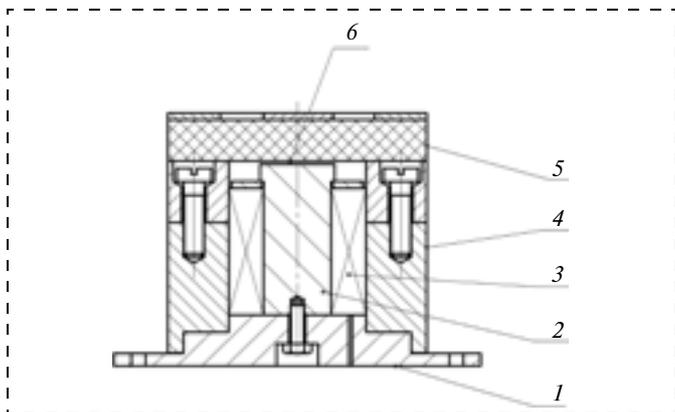


Рис. 8. Схема активного однокоординатного МЭ демпфера

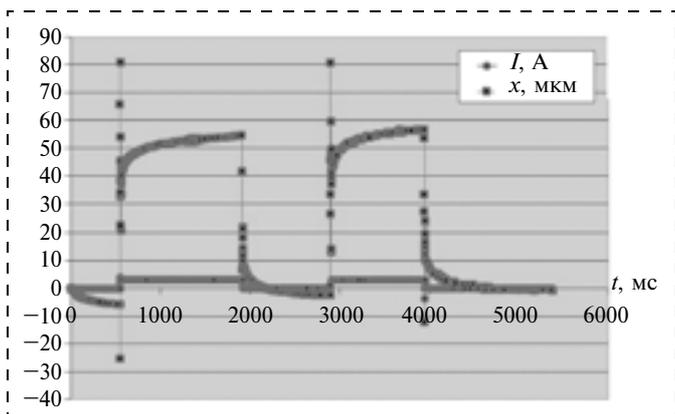


Рис. 9. График переходного процесса при нагрузке 6,5 Н и управляющем токе 1,5 А

системы обладают малой жесткостью, низкой частотой собственных колебаний, малыми массой и габаритными размерами, а также малым временем переходного процесса.

Целесообразным также представляется разработка виброизолирующей системы на основе МЭ демпферов совместно с пассивными виброизоляторами. В этом случае происходит низкочастотная компенсация стационарных возмущений защищаемого объекта с помощью активных МЭ демпферов и пассивная виброзащита в области более высоких частот. Основным показателем, характеризующим эффективность виброизоляции, является коэффициент передачи амплитуды колебаний μ . Обычно однокаскадные системы с применением массивных элементов обеспечивают коэффициент передачи $\mu = 0,01 \dots 0,05$. Для прецизионного оборудования необходимо обеспечить коэффициент передачи $\mu = 0,001 \dots 0,003$ при уровне колебаний фундамента 5...7 мкм.

Исследование МЭ демпфера

МЭ демпфер (рис. 8) содержит мембрану 1 из магнитоуправляемого эластомера с жестким центром, электромагнитную катушку 2, магнитопровод 3, сердечник 4. Между мембраной 1 и сердечником 4 сформирован воздушный зазор 5. Демпфер работает следующим образом. При подаче управляющего тока в электромагнитную катушку 2 в демпфере возникает замкнутое магнитное поле. В мембране 1

формируется радиальное магнитное поле с индукцией, имеющей максимум вблизи сердечника 4. Под действием этой магнитной индукции мембрана 1 с жестким центром перемещается в осевом направлении в пределах воздушного зазора 5.

При проведении исследований МЭ демпфер был оснащен емкостным датчиком перемещения жесткого центра мембраны 1 и системой управления на основе персонального компьютера (ПК). Сигнал от емкостного датчика перемещения поступал через АЦП в компьютер, сохранялся и отображался на экране монитора. При проведении исследований были получены графики переходных процессов при перемещении демпфера при нагрузке 6,5 Н и для входного ступенчатого управляющего сигнала 1,5 А (рис. 9). На жесткий центр мембраны 1 демпфера (см. рис. 8) устанавливался груз 6,5 Н, после чего подавался ток фиксированной силы. На графиках представлены перемещения демпфера (в микрометрах) в зависимости от времени (в миллисекундах) при включении-выключении тока на катушке 2 (рис. 9).

Быстродействие демпфера определяется временем переходных процессов в магнитоэластике. Время структурирования реологической среды $t_{стр}$ и релаксации t_p сдвиговых напряжений определяется отношением

$$\mu_{эКВ}(H)/E,$$

где $\mu_{эКВ}(H)$ — динамическая эквивалентная вязкость МЭ; E — модуль упругости МЭ. Эти параметры, а также значения времени могут регулироваться за счет изменения уровня напряженности магнитного поля путем изменения силы тока в катушке [5].

Как видно из графика (рис. 9), диапазон перемещений несколько возрастает от 55 до 57 мкм при подаче последовательности управляющих сигналов, что связано с постепенным нагревом МЭ мембраны. Кроме того, деформация мембраны увеличивается при фиксированном управляющем сигнале, что можно объяснить существенным возрастанием индукции в мембране при уменьшении воздушного зазора 5 между мембраной и сердечником (см. рис. 8). Быстродействие демпфера (постоянная времени) составляет около 10 мс.

Выводы

- Анализ уровня колебаний опорной поверхности нанотехнологического и исследовательского оборудования позволил сформулировать ряд принципиально новых требований к перспективным нанопозиционирующим и демпфирующим системам, а именно, сочетания достаточной величины перемещения с высокой точностью позиционирования, быстродействием и нагрузочной способностью. Кроме того, необходимо объединение функций юстировки и виброизоляции в одном модуле.
- Анализ устройств сверхточного перемещения показал, что для нанотехнологического и исследовательского оборудования целесообразно использовать устройства сверхточного перемещения и активной виброизоляции на основе магнито- и электрореологических жидкостей, а также магнитоуправляемых эластомеров.

- Целесообразным представляется разработка виброизолирующей системы на основе МЭ демпферов совместно с пассивными виброизоляторами. В этом случае низкочастотная компенсация возмущений защищаемого объекта происходит с помощью активных МЭ демпферов, а пассивная виброзащита в области более высоких частот обеспечивается традиционными вязкоупругими демпферами.
- Быстродействие демпфера определяется временем переходных процессов в магнитоэластике. Время структурирования реологической среды и релаксации сдвиговых напряжений определяется отношением $\mu_{\text{ЭКВ}}(H)/E$, где $\mu_{\text{ЭКВ}}(H)$ — динамическая эквивалентная вязкость МЭ; E — модуль упругости МЭ. Эти параметры могут регулироваться за счет изменения уровня напряженности магнитного поля.

Работа выполнена при проведении НИР в рамках реализации ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009—2013 годы (Государственный контракт № П692 от 12 августа 2009 г. с Федеральным агентством по образованию РФ).

1. Александрова А. Т., Вагин Н. С., Василенко Н. В. и др. Механика и физика точных вакуумных механизмов: в 2 т. / Под ред. Е. А. Деулина. М.: НПК "Интелвак"; Вакууммаш, 2002. Т. 2. 152 с.
2. Сычѳв В. В. Адаптивные оптические системы в крупногабаритном телескопостроении. Старый Оскол: ООО "ТНТ", 2005. 464 с.
3. Камышин Н. Н., Курчанова М. В., Логинов П. В. Система виброизоляции прецизионного технологического оборудования // Изв. вузов. Машиностроение. 1988. № 10. С. 150—155.
4. Шульман З. П., Кордонсий В. И. Магнитореологический эффект. Минск: Наука и техника, 1982. 184 с.
5. Горбунов А. И., Михайлов В. П., Степанов Г. В., Борин Д. Ю., Андриянов А. А., Темпов Д. В., Семеренко Д. А. Исследование свойств и новое применение магнитных силиконовых композитов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2008. № 1 (70). С. 90—107.
6. Юревич Е. И. Теория автоматического управления. 3-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2007. 560 с.
7. Попов В. В., Салецкий А. М. Наномеханообработка. Возможности и перспективы // Российские нанотехнологии. 2008. № 9—10. С. 32—35.

УДК 621.32

Д. В. Негров, студент,
А. С. Лейченко, аспирант,
Е. П. Шешин, д-р физ.-мат. наук, проф.
Московский физико-технический институт
(государственный университет),
e-mail: sheshin@mail.mipt.ru

ЭЛЕМЕНТ ДИСПЛЕЙНОЙ МАТРИЦЫ НА ОСНОВЕ АВТОЭМИССИОННОГО КАТОДА ИЗ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА

Рассматривается автоэмиссионный катод латеральной конструкции из терморасширенного графита в качестве источника свободных электронов для катодолюминесцентного прибора. За счет изменения конструкции электронно-оптической системы достигается значительное увеличение активной площади катода на единицу его геометрической площади. Проводится моделирование электронно-оптической системы.

Ключевые слова: автоэлектронная эмиссия, катодолюминесцентные источники света, электронная оптика, углеродные материалы

Дисплейные устройства, основанные на явлении автоэлектронной эмиссии, имеют все преимущества обычных ЭЛТ-дисплеев. При этом такой дисплей можно сделать очень тонким, так как он не будет требовать ни сложной электронной оптики, как ЭЛТ-дисплей, ни системы подсветки, как ЖК-дисплей [1].

Для увеличения эффективности автоэлектронного эмиттера важную роль играет форм-фактор — гео-

метрические параметры электронно-оптической системы и самого катода, как части ее. Существуют различные подходы к построению электронно-оптической системы прибора с автокатодом: *spindt*-технология [2]; тонкопленочные эмиттеры, основанные на эффекте Малтера [3]; SED (*surface emission device*)-технология [4] и т. д. В данной работе рассматривается система с латеральным катодом, когда эмитирующая поверхность перпендикулярна плоскости модулятора и анода. Преимуществами такой системы являются увеличение относительно *spindt*-систем площади эмитирующей поверхности на единицу поверхности катодной подложки [5], защита эмитирующей поверхности катода от бомбардировки ионами остаточных газов, уменьшение емкости межэлектродного промежутка, а также возможность использования при изготовлении приборов экономичных технологий [5—8]. Системы с латеральным эмиттером уже доказали свои преимущества в различных реализациях. Однако все они сталкиваются с серьезной проблемой. Используемые в такой конструкции тонкопленочные катоды имеют малую устойчивость к процессам деградации, что делает срок службы прибора недопустимо малым.

Терморасширенный графит (ТРГ) — это конструкционный материал, получаемый из обеззоленного графита путем термической обработки. ТРГ также химически инертен и термостоек, он хорошо поддается механической обработке. Благодаря развитой поверхности ТРГ является хорошим автоэлектронным эмиттером [9].

В нашей работе исследуется плоское автоэлектронное устройство вертикальной конструкции и подкатодным модулятором. Подобные конструкции рассмотрены, например, в работах [10, 11]. В качест-

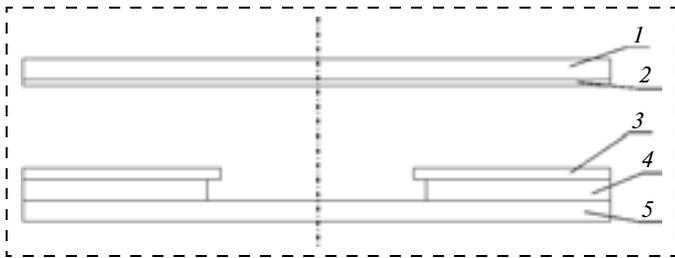


Рис. 1. Конструкция устройства:
1 — анод (стекло с ITO слоем); 2 — слой люминофора; 3 — катод (ТРГ); 4 — изолятор; 5 — модулятор

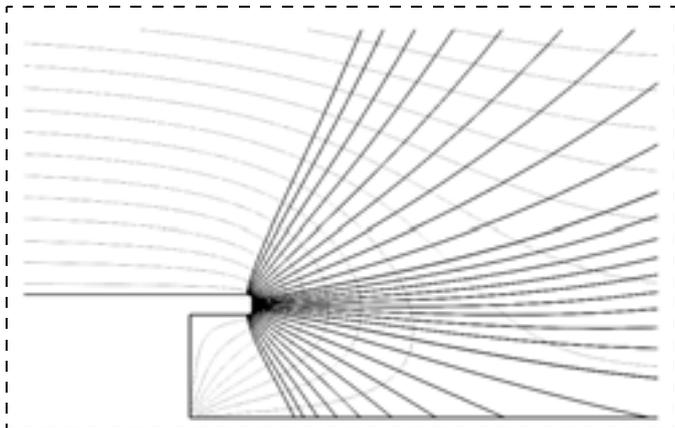


Рис. 2. Результат моделирования траекторий электронов вблизи эмиттирующей части катода

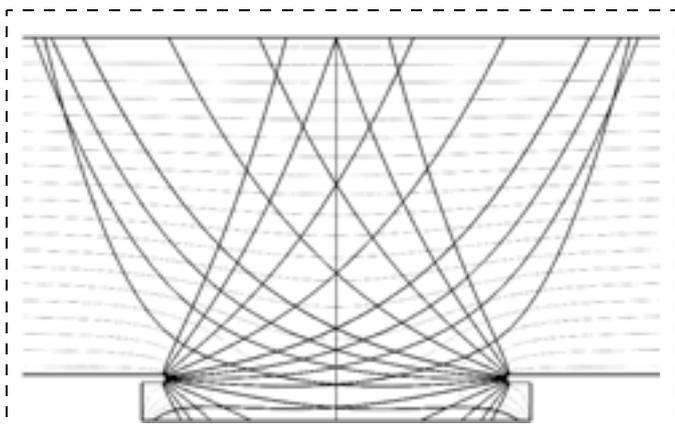


Рис. 3. Траектории электронов в автоэлектронном источнике света

ве материала катода предполагается использование ТРГ. Конструкция устройства изображена на рис. 1.

Для использования такой конструкции в качестве элемента матрицы автоэмиссионного дисплея необходимо, чтобы изображение, формируемое электронами на аноде, было не больше определенного диаметра.

Для более детального понимания работы предлагаемого прибора проведено моделирование электронно-оптической системы. В данной конструкции электроны, эмиттировавшие с торца катода, будут двигаться преимущественно к центру конструкции за счет модулятора. На рис. 2 показан результат численного решения уравнения Лапласа и уравнений движения электронов вблизи эмиттирующей части катода. Видно, что траектории электронов (показа-

ны черным), начинающиеся на эмиттере, направлены к центру конструкции.

Благодаря этому диаметр изображения можно сделать примерно равным диаметру отверстия в катоде при подходящем положении анода. На рис. 3 показан результат моделирования всей конструкции в целом. Размер изображения действительно примерно соответствует размеру отверстия в катоде.

Также можно видеть, что токоперехват не превышает 30 %. При этом, если использовать для модулятора материал с высоким коэффициентом вторичной эмиссии, то можно увеличить эффективность за счет вторичных электронов, эмитирующих с модулятора.

Возможные траектории вторичных электронов показаны на рис. 4. Видно, что они фокусируются благодаря полю, создаваемому катодом.

Итак, мы видим, что такое устройство хорошо подходит для формирования пикселя или субпикселя дисплейной матрицы благодаря небольшому размеру изображения на аноде. Процесс изготовления матрицы благодаря простоте конструкции отдельных элементов также представляется довольно простым и технологичным.

Для реализации предложенной конструкции необходимо сформировать отверстия в фольге ТРГ. При этом эмиттирующая поверхность образуется на срезе фольги выпирающими "чешуйками". Было рассмотрено два вида обработки: механическая (протыкание, вырезание, сверление) и лазерная. При обработке лазерным излучением за счет сверхбыстрого нагрева поверхности происходит изменение ее структуры [11]. В случае латерального катода лазерное излучение используется для создания отверстий в катодной пластине и одновременно формирования по периметру этих отверстий развитой эмиттирующей поверхности. Управляя мощностью и диаметром лазерного луча можно создавать катодные отверстия определенной формы и морфологии.

Было проведено сравнение эмиссионных характеристик катодов обоих типов обработки. Катоды одинаковых геометрических размеров помещали в идентичные электронно-оптические системы. Проводили измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) в диодном режиме, где анодом служил модулятор (см. рис. 1). Характерные ВАХ диодов с катодами, прошедшими различную обработку, представ-

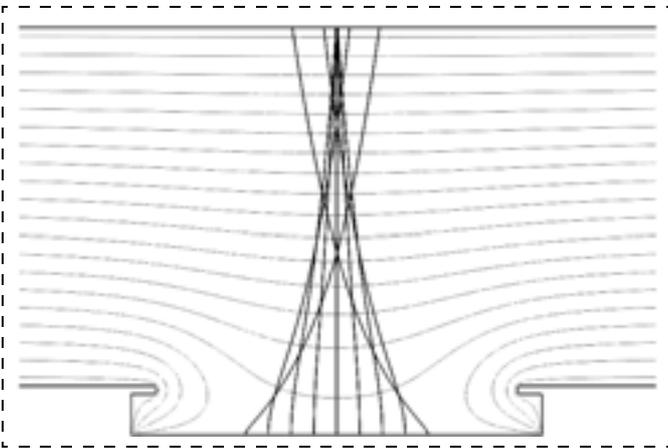


Рис. 4. Возможные траектории вторичных электронов

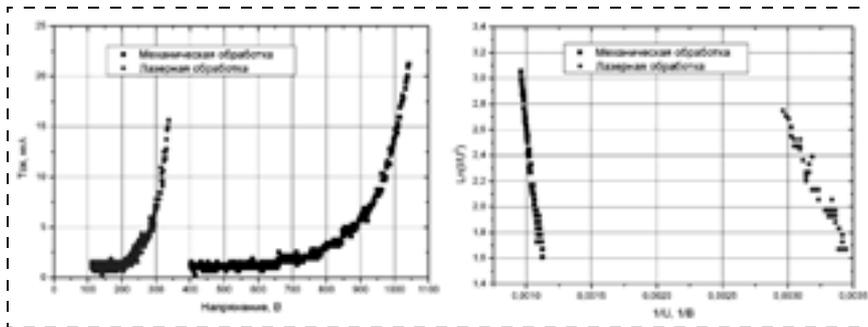


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики диодов с катодами, прошедшими различную обработку:

a — в обычных координатах; *б* — в координатах Фаулера—Нордгейма

лены на рис. 5. Рабочие напряжения катодов после лазерной обработки в 3 раза ниже, а форм-фактор, оцененный с помощью теории Фаулера—Нордгейма, на порядок больше, чем у катодов, прошедших механическую обработку. Также они показали стабильную эмиссию в ходе долговременной наработки.

На основании этих данных было решено использовать катоды, подвергшиеся лазерной обработке для испытаний в триодном режиме. Характерный размер автоэмиссионного изображения катода ~1 мм практически совпадает с диаметром катодного отверстия, что подтверждает предположения, сделанные в ходе моделирования электронно-оптической системы.

Использование углеродной фольги в качестве материала латерального автоэмиссионного катода позволило увеличить площадь рабочей поверхности катода, снизить токовую нагрузку на отдельные эмиссионные

центры, уменьшить размеры прибора и размер автоэмиссионного изображения отдельного катода. Предложенная конструкция может быть использована для создания плоского дисплея, источника света большой площади, а также других электровакуумных приборов с мощным безынерционным источником свободных электронов.

Список литературы

1. **Arfaoni I.** et al. Toward lighting devices and flat panel displays based on carbon nanotube field emitter // *IVESC Proc.* 2002. P. 139.
2. **Spindt C. A., Shoulders K. R., Heynick L. N.** Field emission cathode structures and devices utilizing such structures // *US Patent* 3,755,704. 1973.
3. **Fink R. L., Tolt Z. L., Theusen L. H., Yanuv Z., Kasano K., Tatsuda K.** II Proc. Int. Displays Workshop. 1999. FED1-5. P. 911—912.
4. **Sagawa M., Kusunoki T., Suzuki M., Tsuji K.** // *SID 01 Digest.* 2001. V. 14.2. P. 193—195.
5. **Abanshin N. P.** et al. Thin-film planar edge-emitter field emission plat panel display // *US Patent* 6,590,320. 2003.
6. **Johnson B. R., Aikinwande A. I., Murphey D.** // *J. Vac. Sci. Technol. B.* 1997. V. 15. P. 535—538.
7. **Karpov L. D.** Edge emitter with secondary emission display // *U. S. Patent* 6,023,126. 2000.
8. **Takeuchi Yu.** et al. Electron emitting device and field emission display using the same // *U. S. Patent* 7,088,049. 2006.
9. **Шешин Е. П.** Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов. М.: Изд. МФТИ, 2001.
10. **A simple structure and fabrication of carbon-nanotube field emission display** / Y. S. Choi, J. H. Kang, H. Y. Kim et al. // *Applied Surface Science.* 2004. V. 221. P. 370—374.
11. **Образцов А. Н.** и др. Влияние лазерного облучения на морфологию и эмиссионные свойства наноуглеродных пленок // *ЖТФ.* 2005. Т. 75, вып. 6. С. 136—139.

Вторая международная специализированная выставка

ИННОВАЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

1 - 3 марта 2011 года
Москва, МВЦ Крокус Экспо,
павильон 1, зал 1

MIREXPO ОРГАНИЗАТОР: Выставочная компания "Мир-Экспо"

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ: Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской Академии Наук, Союза Термистов России, Союза производителей композитов.

ОСНОВНЫЕ РАЗДЕЛЫ:

- Магниты
- Функциональные наноматериалы
- Высококачественные вещества
- Техническая керамика
- Редкоземельные металлы

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА:

ДЕЛОВАЯ ПРОГРАММА:

2 марта 2011 г. в МВЦ "Крокус Экспо", павильон 1, зал 1, в рамках выставки проводится Вторая научно-практическая конференция "Перспективы использования инновационных материалов и технологий в промышленности".

Оргкомитет: Россия, 115533, Москва-проспект Андропова, 22
Тел./факс: 8 499 618 05 65, 8 499 618 36 83, 8 499 618 36 88 | imt@mirexpo.ru | www.mirexpo.ru

УВАЖАЕМЫЕ ДАМЫ И ГОСПОДА!

Приглашаем Вас принять участие в работе
II международной специализированной выставки

"Нанотехнологии. Казань-2010"

и XI международной научно-практической конференции
"Нанотехнологии в промышленности"

8—10 декабря 2010 года

ОРГАНИЗАТОРЫ ВЫСТАВКИ

Правительство Республики Татарстан
Министерство промышленности и торговли Республики Татарстан
Мэрия города Казани
ОАО "Казанская ярмарка"

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ

Государственной Корпорации "РОСНАНО"

ЭКСПОЗИЦИЯ ВЫСТАВКИ

- наноматериалы и нанотехнологии
- технологии и оборудование для производства наноматериалов
- услуги в области нанотехнологий
- готовая продукция с использованием нанотехнологий и наноматериалов
- применение нанотехнологий в различных областях промышленности
- наноинженерия и наноэлектроника
- модули и оригинальные компоненты на основе наноматериалов
- наноматериалы для компонентов и микросистем
- инновации

ЦЕЛИ ВЫСТАВКИ

- Демонстрация уникальных достижений предприятий и научных коллективов в области нанотехнологий и наноматериалов, содействие их продвижению на международный рынок
- Содействие внедрению нанотехнологий в различные области науки, техники и производства
- Продвижение на рынок высокотехнологичной продукции и принципиально новых материалов с уникальными потребительскими свойствами
- Содействие формированию и реализации региональных программ по нанотехнологиям и наноматериалам
- Содействие коммерциализации результатов научно-технической деятельности гражданского назначения

УЧАСТНИКИ ВЫСТАВКИ

Российские производители оборудования для различных отраслей промышленности, научно-исследовательские и проектные институты, высшие учебные заведения, научные лаборатории, научно-исследовательские центры, инвестиционные фонды, финансовые и консалтинговые компании, министерства и ведомства, отраслевые союзы и ассоциации, представители российских и зарубежных деловых кругов.

КОНФЕРЕНЦИЯ

В рамках деловой программы выставки состоится XI международная конференция "Нанотехнологии в промышленности", организатором которой выступят Академия наук Республики Татарстан, Казанский Государственный Технический Университет им. А. Н. Туполева, Казанский государственный университет им. Ульянова-Ленина, Казанский Государственный технологический университет им. С. М. Кирова с участием ведущих ученых и специалистов, органов государственной власти и промышленных предприятий России и зарубежья.

Стоимость участия для компаний РФ и СНГ

Регистрационный сбор — 3500 руб.
Оборудованная выставочная площадь —
3 500 руб. за 1 кв. м
Открытая выставочная площадь —
1500 руб. за 1 кв. м

Цены даны с учетом НДС

Стоимость участия для иностранных компаний

Регистрационный сбор — 115 евро
Оборудованная выставочная площадь —
115 евро за 1 кв. м
Открытая выставочная площадь — 50 евро за 1
кв. м

МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ

ОАО "Казанская ярмарка" — один из крупнейших и динамично развивающихся выставочных центров России, является членом Российского Союза Выставок и Ярмарок (РСВЯ) и Всемирной Ассоциации выставочной индустрии (УФИ). Система менеджмента качества ОАО "Казанская ярмарка" сертифицирована на соответствие требованиям Международного стандарта ISO 9001—2008. На территории выставочного центра расположены 3 павильона общей площадью 6700 кв. м, павильон приемов и презентаций VIP-класса, бизнес-центр. Площадь всей территории выставочного комплекса — 12,1 га.

ОРГКОМИТЕТ ВЫСТАВКИ:

Тел./факс: (843) 570-51-15, 570-51-11-круглосуточно
Россия, 420059, г. Казань, Оренбургский тракт, 8, ОАО "Казанская ярмарка"
E-mail: kazanexpo@telebit.ru, dl@expokazan.ru
<http://www.expokazan.ru>, [www. nanotehexpo.ru](http://www.nanotehexpo.ru)

ИТОГИ ПРОВЕДЕНИЯ I МЕЖДУНАРОДНОЙ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ ВЫСТАВКИ "НАНОТЕХНОЛОГИИ. КАЗАНЬ-2009" И X МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ "НАНОТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ"

В работе I международной специализированной выставки "Нанотехнологии. Казань-2009" приняли участие 64 компании. Площадь экспозиции составила 512 кв. м.

Участниками выставки стали предприятия и организации из городов: Казань, Москва, Санкт-Петербург, Пермь, Томск, Воронеж, Менделеевск, Саров, Курск, Белгород, Набережные Челны, а также московское представительство компании из Японии.

Всего выставку посетили около 3000 человек из 25 городов и районов Республики Татарстан, а также из 27 городов Российской Федерации: Москвы, Санкт-Петербурга, Екатеринбурга, Красноярска, Новосибирска, Оренбурга, Перми, Самары, Тулы, Челябинска, Ярославля, областей: Владимирской, Кировской, Ленинградской, Московской. Нижегородской, Оренбургской, Самарской, Томской, Ульяновской, Пермского края, республик: Башкортостана, Чувашии, Удмуртии. Из стран зарубежья выставку посетили представители Украины и Чехии.

В конференции приняли участие 316 человек, в том числе представители вузов Казани, Москвы, Самары, Ижевска, Уфы, Украины, предприятий нефтегазовой, химической, авиа- и автомобильной промышленности, госучреждений и научно-исследовательских институтов РАН и Академии наук Республики Татарстан.

По итогам конференции был организован Круглый стол под председательством Первого вице-преьера Республики Татарстан Б. П. Павлова, где обсуждались результаты работы, были подведены итоги прошедшего нанофорума, сделаны выводы и выработаны соответствующие рекомендации.

CONTENTS

- Bulyarskiy S. V., Basaev A. S., Galperin V. A., Pavlov A. A., Pyatilova O. V., Tsigantsov A. V., Shaman Yu. P.** *Homogeneous and Heterogeneous Formation of Cluster of Catalyst for Carbon Nanotubes Growth* 2
A deep understanding of the principles of carbon nanotubes formation as well as the creation of models of synthesis of CNTs, that determine their functional properties. Formation of clusters in the volume of the reactor and on the surface of the substrate is the initial stage of the synthesis of carbon nanotubes. We developed the thermodynamic of homogeneous and heterogeneous cluster's formation for CVD process with "flying" catalysts. Studied experimentally and theoretically the parameters of cluster formation, resulting from the pyrolysis of ferrocene. It is shown that the surface tension and the size of the clusters depend strongly on the temperature. The coefficients of surface tension, as well as the characteristic size of clusters have been calculated. These dependencies and parameters enable to recover the distribution function of cluster size, setting the temperature in the working zone and in the field of sublimation of ferrocene. This making possible to predict the size of the clusters, depending on the synthesis parameters, including temperature.
Keywords: cluster formation, catalyst, CNT
- Mustafaev G. A., Mustafaev Ab. G., Mustafaev Ar. G.** *Design Influence on Submicron Soi Mosfets Characteristics* 8
In work modeling of SOI MOSFET with double, triple and ring gate is spent. SOI MOSFET subthreshold characteristics dependence on geometry of body, channel length and width, gate oxide thickness and channel doping level is investigated.
Keywords: silicon on insulator, modeling, MOSFET
- Mishina E. D., Sigov A. S., Kazantseva E. V., Mukhortov V. M.** *Excitation of Polarization Oscillations by an Electric Pulse Transmitted through a Thin Ferroelectric Film*. 13
Polarization dynamics in a thin ferroelectric film is investigated under an electric pulse action. The polarization decay in a thin film is accompanied by oscillations near the equilibrium position. The polarization transient dynamics is described qualitatively by the phenomenological Ginzburg theory.
Keywords: ferroelectrics, thin films, ultrafast transient phenomena, electrically induced polarization switching
- Babaevsky P. G., Zhukov A. A., Korpuhin A. S., Reznichenko G. M.** *Stress-Strain Behaviour of Modified Polyimide-Silicon Microstructural Elastic Hinges* 15
Studied the deformation-strength properties in tension polyimide-silicon trapezoidal elastic-hinged microstructures, modified by reinforce the bottom of the polyimide layer of functionalized single-walled carbon nanotubes and coating the surface of silicon thin layers of silicon compounds, aluminum and vanadium-nickel system. It is shown that the introduction of reinforcement polyimide nanotubes in all cases increases the strain-strength characteristics of microstructures.
Keywords: polyimide, silicon, trapezoidal elastic-hinged microstructure, microelectromechanical systems, the coefficient of thermal linear expansion, single-wall carbon nanotubes
- Seregin D. S.** *An Effect of Crystallization Temperature on Ferroelectric Properties of PZT Films* 19
An effect of crystallization temperature on ferroelectric properties of PZT films prepared by chemical solution deposition is studied. The samples annealed at 600–700 °C have typical hysteresis loops and CV characteristics. With the increase of crystallization temperature the remanent polarization, squareness of hysteresis loops, and leakage current are decreased, whereas breakdown voltage is somewhat increased.
Keywords: sol-gel, films, ferroelectric, crystallization, annealing, hysteresis
- Bokarev V. P., Gornev E. S.** *Application of Contact Lithography in Processes of Manufacturing Submicronic MEMS and Saw Devices* 23
The applicability of contact, projective and imprint lithographs at manufacturing submicronic MEMS and SAW — devices are considered.
Keywords: contact lithography, projective lithography, immersion lithography; imprint lithography, photoresist, photomask submicron sizes, MEMS, SAW-devices
- Afanasiev M. S., Mitiagin A. Yu., Chucheva G. V., Kosarev S. A., Kolodiagni I. Yu.** *Technology of Production of Accumulators of Hydrogen Based on the Carbon Films Alloyed by Fluorine*. 27
In the paper are shown theoretical and experimental researches of technology of production of solid-state sorbents based on fluorine-carbon films for creation of effective accumulators of hydrogen.
Keywords: CVD-method, fluorine-carbon film, hydrogen accumulator
- Shtennikov V. N.** *Technique of Maintenance of the Demanded Temperature of the Contact Soldering* 30
Quality of soldering connections first of all depends on soldering temperature. Standard modes of installation do not guarantee reception qualitative soldered connections of a unique design. The author of article develops

and approves a technique of maintenance of the demanded temperature of the contact soldering for connections not a typical design.

Keywords: the device, assemblage, microelectronics, the soldering, quality

Voitsekhovskii A. V., Kokhanenko A. P., Korotaev A. G., Grigor'ev D. V., Kulchitsky N. A., Melnikov A. A. *Irradiation Influence on Characteristics of Charge Coupled Devices* 32

The review of the available data on radiating hardness of charge coupled devices are observed. γ -ray, neutrons, electrons and protons irradiation influence on formation of radiation defects in various types of charge coupled devices and change of their characteristics are considered. Radiation effect explanations are presented.

Keywords: charge coupled devices, radiation effects, radiation-hardened devices

Dragunov V. P., Ostertak D. I. *Electrostatic Interactions in MEMS with Plane-Parallel Electrodes. Part I. Estimation of the capacitance* 37

The different approaches for calculation of the capacity of plane capacitor, composed of two identical square or round electrodes, versus interelectrode gap and relative electrodes displacement are compared. The deviations arising from capacitance calculations using different approaches are calculated. The analytical expression for capacitance estimation in case of the overlapping electrodes is presented.

Keywords: MEMS, electric capacitance, plane capacitor, fringing field effect, analytical expressions

Boronahin A. M., Ivanov P. A., Surov I. L. *Correction of Linear Acceleration's Influence on the Indications of MEMS-Based Gyro* 41

The paper presents the error model, describing influence of linear acceleration on the indications of MEMS-based gyro, and the algorithm, which allows to correct this influence. The system under test was inertial measurement unit based on micromechanical sensors produced by Analog Devices. The research has been performed by using a small-sized two-axis rotary test table developed by department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint-Petersburg Electrotechnical University.

Keywords: inertial navigation, error model, micromechanical gyro, small-sized two-axis test table

Mikhailov V. P., Basinenkov A. M., Kusnetsov A. S., Sobov I. K., Shakov K. G. *Rheological Systems for Micro- and Nanopositioning and Vibration Isolation* 45

The advanced precise equipment for electronic and engineering technology is usage multicoordinate mechatronic actuators for the ultra-precise positioning. The analysis, design and parameters of the new magnetic rheology (MR), electric rheology (ER) and magnetorheological elastomer actuators are presented. The combination of MR or ER loop control, elastic carriers and thin wall seals ensures small error of linear (≤ 100 nm) and angular ($\leq 0,2$ ang. sec) positioning, small time of response (≤ 200 ms), total linear travel on three coordinates X, Y, Z (1...10) mm and load capacity (1...1000) N.

Keywords: positioning and vibration isolation systems, magneto- and electrorheological fluids and elastomers, viscosity

Negrov D. V., Leychenko A. S., Sheshin E. P. *Display Element Based on Thermally Expanded Graphite Field Emission Cathode* 50

Edge field emission cathode made of thermal expanded graphite is considered as electron source for cathodoluminescent device. Changing the principle of the electron-optical system formation provided for considerable cathode operating area per cathode substrate area increase.

Electron-optical system and electron trajectories modeling for round cathode is held.

Keywords: field emission, cathodoluminescent light sources, electron optics, carbon materials

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://www.microsystems.ru

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромьинский пер., 4. Телефон редакции журнала (499) 269-5510. E-mail: nmst@novtex.ru

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства

в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Дизайнер Т. Н. Погорелова. Технический редактор О. А. Ефремова. Корректор Т. В. Пчелкина

Сдано в набор 20.05.2010. Подписано в печать 23.06.2010. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 8,67. Заказ 552. Цена договорная

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика", 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15