

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 2 ✧ 2006

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Журнал выпускается при научно-методическом руководстве
Отделения информационных технологий и вычислительных систем
Российской Академии наук

Издается с 1999 г.

Главный редактор

Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора

Лучинин В. В.

Редакционный совет:

Аристов В. В.
Асеев А. Л.
Гапонов С. В.
Каляев И. А.
Климов Д. М.
Ковальчук М. В.
Лифшиц В. Г.
Мокеров В. Г.
Никитов С. А.
Чаплыгин Ю. А.
Шевченко В. Я.

Редакционная коллегия:

Абрамов И. И.
Антонов Б. И.
Астахов М. В.
Быков В. А.
Волчихин В. И.
Гоев А. И.
Горнев Е. С.
Градецкий В. Г.
Гурович Б. А.
Журавлев П. В.
Захаревич В. Г.
Кальнов В. А.
Карякин А. А.
Квардаков В. В.
Кузин А. Ю.
Мокров Е. А.
Норенков И. П.
Панич А. Е.
Панфилов Ю. В.
Петросянц К. О.
Петрунин В. Ф.
Путилов А. В.
Пятьшев Е. Н.
Сауров А. Н.
Сигов А. С.
Сухопаров А. И.
Телец В. А.
Тодуа П. А.

Отв. секретарь

Лысенко А. В.

Редакция:

Безменова М. Ю.
Григорин-Рябова Е. В.
Чугунова А. В.

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

- Бабаевский П. Г., Жуков А. А., Шаповал С. Ю., Гринькин Е. А.** Адгезионное взаимодействие твердых поверхностей и создание полимерных "сухих" адгезивов. Теоретические аспекты 2
- Ландышев А. В., Лаврентьев А. А., Ландышев В. А.** Исследование влияния концентрационных неоднородностей в сплавах $Bi_2Se_{0,3}Te_{2,7}$ и $Bi_2Se_{0,6}Te_{2,4}$ на их термоэлектрические свойства 8
- Лотонов А. М., Новик В. К., Гаврилова Н. Д.** О дисперсии диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика триглицинсульфата (ТГС) в широкой области температур 14
- Гуртовой В. Г., Шелег А. У.** Низкотемпературные исследования диэлектрических свойств кристалла $K_3Li_{1,88}Nb_{5,12}O_{15,24}$ 22

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

- Бобровник В. Н., Шелепин Н. А.** Анализ собственной частоты и механических напряжений тензопреобразователя кремниевого балочного типа (ТКБ) 25
- Комов А. Н., Курганская Л. В., Щербак А. В.** Безынерционные и высокочувствительные измерители СВЧ мощности больших уровней на базе гетероструктур SiC/Si 28
- Фёдоров Р. А., Шелепин Н. А.** Разработка схемы, поддерживающей резонансные колебания чувствительного элемента микромеханической системы 35

СПРАВОЧНЫЕ СТРАНИЦЫ

- Лучинин В. В., Мальцев П. П.** О термине "микросистемная техника" в русском и английском языках 39
- Яшин К. Д., Лацапнёв Е. В.** Англо-русский терминологический словарь по микро- и наносистемной технике 42

СТРАНИЧКА РФФИ 45

НОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ 50

ИНФОРМАЦИЯ

- Новости** от Sharp Microelectronics 54
- Новые книги** 55
- Contents** 56

Журнал включен в перечень научных и научно-технических изданий ВАК России

Аннотации статей журнала на русском и английском языках и требования к оформлению статей доступны на сайте журнала: <http://www.microsystems.ru>.

ПОДПИСКА:

- по каталогу Роспечати (индекс 79493);
- по каталогу "Пресса России" (индекс 27849)
- в редакции журнала (тел./факс: 269-55-10)

УДК 539.612

П. Г. Бабаевский*, д-р техн. наук,
А. А. Жуков*, д-р техн. наук,
С. Ю. Шаповал**, канд. техн. наук,
Е. А. Гринькин*,
*"МАТИ" — Российский государственный
технологический университет
им. К. Э. Циолковского, г. Москва
**Институт проблем технологии
микроэлектроники и особо чистых материалов
РАН, г. Черноголовка Московской области

АДГЕЗИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТВЕРДЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ И СОЗДАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ "СУХИХ" АДГЕЗИВОВ. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

С использованием представлений о механизме "сухой" адгезии в природе и имеющихся в литературе теоретических данных рассмотрены физические и геометрические аспекты образования адгезионных связей между твердыми поверхностями в отсутствие жидкого адгезива, критерии выбора материала и микро- или наноразмерной структуры "сухих" адгезивов, их адаптация к поверхностям и эффект самоочищения.

Еще за 350 лет до нашей эры Аристотель отмечал удивительную способность некоторых ящериц, в частности гекконов, перемещаться по сухим и мокрому, шероховатому и совершенно гладким поверхностям, по вертикальным стенам и даже свисать с потолка [1]. Механизм явления, лежащего в основе этой способности, удалось выявить лишь в последние годы в результате исследований эпителия конечностей геккона вида *Toxostoma gecko* [2–4].

Исследования с помощью сканирующего электронного микроскопа показали, что поверхность каждого из пальцев животного покрыта миллионами "микроворсинок" длиной от 30 до 130 мкм и диаметром около 5 мкм. Каждая "микроворсинка" разделяется на 100...1000 лопаточковидных "нано-ворсинок" диаметром 100...200 нм, на кончиках которых имеются головки ("шляпки") диаметром 300...500 нм (рис. 1, см. вторую сторону обложки). Таким образом, на поверхности пальца геккона площадью 1 мм² имеется около 5000 "микроворсинок". Предполагается, что изгиб "ворсинок" при контакте с твердой поверхностью обеспечивает возникновение сил межмолекулярного притяже-

ния. Хотя сила такого притяжения к гидрофильным и гидрофобным поверхностям для одиночных "нано-ворсинок" и "микроворсинок" в целом незначительна (около 200 нН и 40 мкН, соответственно), миллионы таких "ворсинок" в сумме способны обеспечить достаточно сильное сцепление. Максимальная измеренная сила притяжения отдельной "микроворсинки" к поверхности составляет 200 мкН. Теоретически 6,5 млн "микроворсинок" пальца геккона способны обеспечить силу сцепления, равную 1300 Н. Однако реально наблюдаемая максимальная сила адгезионного отрыва пальца геккона от твердой поверхности в 30 раз меньше. Очевидно это может быть связано с тем, что эффективная доля "ворсинок", контактирующих с твердой поверхностью, далека от единицы и отрыв пальцев животного от поверхности происходит не равномерно по всей площади контакта, а имеет место отслоение, схожее с процессом развития межфазной трещины.

Подробные исследования состава и свойств эпителия пальцев гекконов [5–7] показали, что "ворсинки" состоят из β-кератина, имеющего модуль упругости E , равный 4 ГПа. Образующая ими поверхность является гидрофобной с краевым углом смачивания водой порядка 160° и способна многократно прилипать как к шероховатым, так и гладким гидрофильным и гидрофобным поверхностям (например, полярного диоксида кремния SiO₂ и неполярного арсенида галлия GaAs), обладая при этом свойством самоочищения. Так как желез, выделяющих адгезионную жидкость, в пальцах геккона при этом не обнаружено, сделано заключение об определяющей роли ван-дер-ваальсовых сил, энергия которых может достигать 40 кДж/моль [8], в механизме взаимодействия поверхностей пальцев геккона и твердых подложек. Авторы работы [9] полагают, что доминирующими при сцеплении "ворсинок" пальцев геккона с твердыми поверхностями могут быть капиллярные силы.

Подобный механизм сцепления с твердыми поверхностями без участия жидких адгезивов наблюдается не только у ящериц, но и у других живых существ [10, 11], в том числе пауков. А. Кесел с сотрудниками [12] показали, что восемь лапок паука *Evarcha arcuata* имеют на своих предплюснах коготки, которые снабжены "ворсинками", покрытыми множеством волосков. Рассчитано, что примерно 624 000 таких волосков имеют среднюю площадь контакта $1,7 \cdot 10^5$ нм², а общая площадь контакта коготков составляет порядка 10^{11} нм². Исследования, проведенные с помощью атомно-

силового микроскопа, показали, что отдельный волосок обеспечивает перпендикулярную к поверхности силу адгезии около 38 нН. Общая сила сцепления лапок паука с поверхностью, приведенная к площади, может составлять порядка 10^5 Н/м^2 .

Таким образом, явление "сухой" адгезии предполагает прилипание друг к другу твердых тел в отсутствие жидкости на межфазной границе раздела. Исследования этого явления, наблюдаемого в живой природе, показывают, что "сухая" адгезия может быть осуществлена искусственно созданием на поверхности микро- и/или наноразмерных "ворсинок" с высоким характеристическим отношением, которые подобно жидкому или вязкотекучему адгезиву, смачивающему твердую поверхность, обеспечивали бы межмолекулярный контакт с поверхностью другого твердого тела и возникновение между ними сил сцепления. В первой части обзора рассмотрены имеющиеся в литературе данные о теоретических аспектах создания искусственных полимерных "сухих" адгезивов, критериях выбора материалов и поверхностных структур.

Очевидно, что при имитации природного механизма "сухой" адгезии искусственные "сухие" адгезивы должны обратимо и многократно прилипать к поверхности подложки и отлипать от нее без разрушения и слипания микро- и наноразмерных "ворсинок" друг с другом и с поверхностью подложки, адаптироваться к ней при различных рельефе и шероховатости, иметь способность к самоочищению и высокую износостойкость. Для создания теоретических основ целенаправленного проектирования и расчета структуры и свойств "сухих" адгезивов, обладающих перечисленными выше свойствами, необходима разработка моделей, которые позволили бы выбрать материал с оптимальными свойствами и определить геометрические параметры (форму, размеры, характер распределения и взаимодействия между собой) "ворсинок" и их физико-химические (поверхностные и упругие) свойства.

Иерархическая трехуровневая модель "сухого" адгезива, изображенная на рис. 2, а (см. вторую сторону обложки), предложена Г. Шахом и М. Ситти [13]. На макроуровне *a* модель состоит из жесткого слоя (основы), на микроуровне *b* — из упругих "микроворсинок" и на наноуровне *c* — из упругих "нановорсинок". Каждый уровень обладает соответствующей податливостью, обеспечивая адаптацию адгезива к твердой подложке с различными рельефом и шероховатостью. "Нановорсинки", обеспечивающие непосредственный, межмолекулярный контакт с поверхностью подложки с различной шероховатостью, представляют собой цилиндрические консольные балки с полусферическим кончиком, ориентированные в одном на-

правлении под произвольным углом к поверхности (рис. 2, б).

Равновесная сила притяжения и отрыва сферического кончика "ворсинки" от плоской поверхности *F* в первом приближении может быть теоретически рассчитана без учета контактных деформаций по теории Джонсона—Кендалла—Роберта (ДКР) или с их учетом по теории Дерягина—Мюллера—Топорова (ДМТ) через поверхностные энергии компонентов в соответствии с уравнением [14, 15]:

$$F = k\pi RW_{12}, \quad (1)$$

где W_{12} — термодинамическая работа адгезии двух фаз ($W_{12} = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \approx 2(\gamma_1\gamma_2)^{1/2}$; γ_1, γ_2 — удельные свободные поверхностные энергии материала "ворсинки" и подложки соответственно; γ_{12} — удельная межфазная поверхностная энергия); *R* — радиус сферического кончика "ворсинки"; *k* — коэффициент пропорциональности, равный 3/2 по теории ДКР и равный 2 по теории ДМТ.

Расчетные данные, определенные по теории ДКР для отдельных "ворсинок" из различных полимеров с радиусом сферического кончика приблизительно 335 нм и поверхности SiO₂ ($\gamma_2 = 160 \pm \pm 40 \text{ мДж/м}^2$), примерно соответствуют экспериментально измеренным значениям при отрыве для отдельных "ворсинок" пальцев геккона и гладких гидрофильных и гидрофобных поверхностей [2—4, 6, 7]. Так, для "ворсинки" из кремнийорганического каучука полидиметилсилоксана (ПДМСО) с $\gamma_1 = 21,4 \text{ мДж/м}^2$ расчет дает теоретически ожидаемую силу $F = 185 \text{ нН}$. Для "ворсинки" из отвержденного ненасыщенного полиэфира (ОНП) с таким же радиусом кончика и $\gamma_1 = 44,6 \text{ мДж/м}^2$ аналогичный расчет дает $F = 279 \text{ нН}$.

Сила *F* по теории ДКР включает все виды взаимодействий, в том числе ван-дер-ваальсовых, вклад которых в нее может быть оценен теоретически по уравнению [16]:

$$F_{vdW} = \frac{A_{12}R}{6d_0^2}, \quad (2)$$

где A_{12} — константа Гамакера для взаимодействия материалов различной природы: "ворсинок" (1) и подложки (2); *R* — радиус кончика "ворсинки"; d_0 — расстояние от кончика "ворсинки" до поверхности в момент отрыва, принятое равным среднему межмолекулярному расстоянию при ван-дер-ваальсовом взаимодействии (0,165 нм). Константа Гамакера A_{12} рассчитывалась как средняя геометрическая констант Гамакера материала "ворсинок" и подложки (A_{11} и A_{22} соответственно) [13]:

$$A_{12} = (A_{11}A_{22})^{1/2}. \quad (3)$$

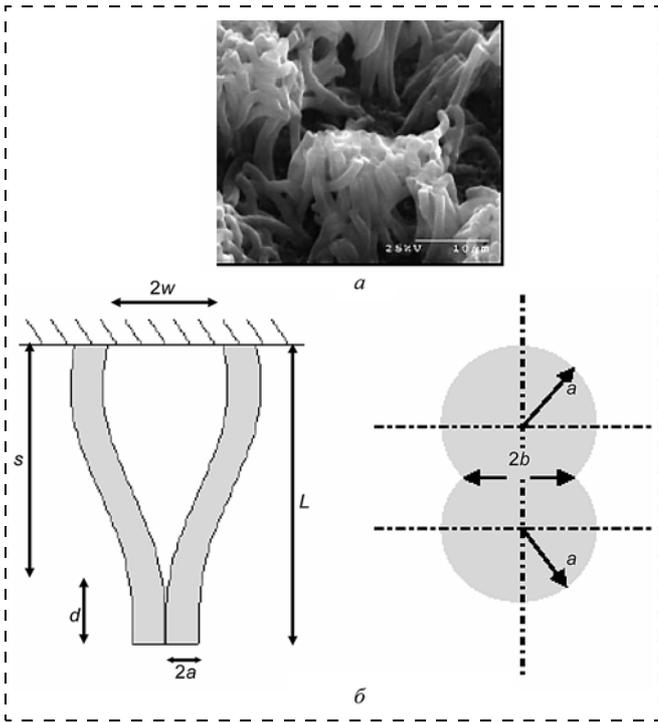


Рис. 3. Сканирующая электронная микрофотография плотно упакованных слипшихся "ворсинок" (а) и модель слипания двух "ворсинок" (б):

L , a — длина и радиус "ворсинок", соответственно; $2w$ — расстояние между ними; s , d — длина неслипшегося и слипшегося участков "ворсинки" соответственно; $2b$ — ширина контакта "ворсинок" [13]

Константы Гамакера материалов рассчитывались по их удельной свободной поверхностной энергии γ с использованием соотношения [13]:

$$A_{11} = 24\pi\gamma d_0, \quad (4)$$

где d_0 — среднее межмолекулярное расстояние при ван-дер-ваальсовом взаимодействии, принятое равным 0,165 нм.

Расчеты для контактов отдельных "ворсинок" из ПДМСО ($A_{11} \approx 45 \cdot 10^{-21}$ Дж) и ОНП ($A_{11} \approx 60,5 \cdot 10^{-21}$ Дж) с поверхностью SiO_2 ($A_{22} \approx 68,5 \cdot 10^{-21}$ Дж) дают значения F_{vdW} , равные 114 нН и 139 нН, соответственно [2–4, 6]. Это составляет примерно 47...63 % от силы, рассчитанной по теории ДКР. Очевидно, что остальной вклад в равновесную силу отрыва "ворсинок" от поверхности подложки могут вносить полярные взаимодействия, капиллярные силы и другие эффекты.

Общая сила связи "ворсинок" с подложкой, приходящаяся на единицу площади адгезива и названная Шахом и Ситти общим адгезионным давлением P_T [13], линейно зависит от числа "ворсинок" на единице площади, т. е. от их густоты, определяемой их диаметром и расстоянием между ними:

$$P_T = F\Delta = F/4(a + w)^2, \quad (5)$$

где F — равновесная сила, приходящаяся на одну "ворсинку"; Δ — густота "ворсинок" (т. е. число "ворсинок", приходящееся на единицу площади), a — радиус "ворсинок"; w — половина расстояния между ними.

Очевидно, что для повышения силы сцепления искусственного "сухого" адгезива с поверхностью подложки, "ворсинки" в нем должны иметь минимальный диаметр и упаковываться как можно плотнее. Однако слишком малый диаметр и, соответственно, малая жесткость и плотная упаковка могут приводить к слипанию "ворсинок" друг с другом (рис. 3, а) [13, 17]. Чтобы избежать этого, "ворсинки" должны обладать достаточно высокой жесткостью при изгибе, определяемой формой их сечения, диаметром и модулем упругости материала, из которого они изготовлены, а также располагаться на достаточно большом расстоянии друг от друга. В работе [13] рассмотрено взаимодействие двух цилиндрических "ворсинок" (рис. 3, б) и выведено условие их неслипания с учетом указанных факторов. Для половины расстояния между "ворсинками" w , необходимого для избежания их слипания, должно выполняться следующее условие:

$$w > \frac{L^2}{a^2} \sqrt{\frac{32\gamma_1 b}{9\pi E}}, \quad (6)$$

где L , a — длина и радиус "ворсинок", соответственно; γ_1 — удельная свободная поверхностная энергия материала "ворсинок"; b — половина ширины их контакта; E — модуль упругости материала "ворсинок".

На рис. 4 показаны зависимости общего адгезионного давления, рассчитанного по уравнению (5)

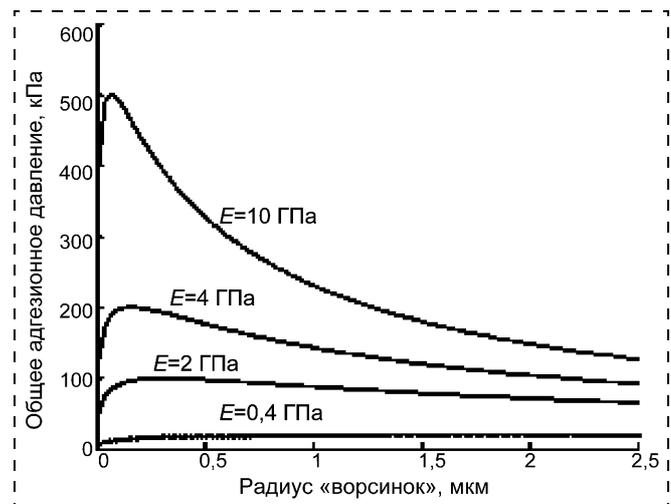


Рис. 4. Общее адгезионное давление, рассчитанное по уравнению (5) для различных модулей упругости материала "ворсинок", при условии неслипания и ван-дер-ваальсового взаимодействия, как функции радиуса "ворсинок" [13]

для двухуровневой модели "сухого" адгезива, от радиуса полимерных "ворсинок" при различных модулях упругости и максимальной густоте "ворсинок", удовлетворяющей условию неслипания (6) [13]. При расчетах учитывалась только ван-дер-ваальсовая составляющая равновесной силы сцепления (2), характеристическое отношение "ворсинок" ($2a : L$) принималось равным $1 : 15$, их удельная свободная поверхностная энергия $\gamma_1 = 48,7$ мДж/м². Константа Гамакера "ворсинок" $A_{11} = 1 \cdot 10^{-19}$ Дж рассчитывалась по уравнению (4), константа Гамакера подложки принималась равной $A_{22} = 7,3 \cdot 10^{-20}$ Дж (стекло). Межфазную константу Гамакера A_{12} рассчитывали по уравнению (3). Из приведенных на рис. 4 результатов видно, что радиус и модуль упругости "ворсинок" полимерного "сухого" адгезива в решающей степени определяют адгезионное давление: более тонкие "ворсинки" с высоким модулем упругости обеспечивают более высокую плотность упаковки и повышение адгезионного давления. Однако с уменьшением толщины "ворсинок" сила адгезии, приходящаяся на единичную "ворсинку", уменьшается. В результате эти два фактора дают максимум адгезии при $a \approx 100$ нм. Максимальное давление при $a \approx 100$ нм и $E = 4$ ГПа по порядку величины соответствует результатам, полученным при оценке адгезии пальцев геккона к твердым поверхностям [6, 7].

Важнейшим требованием к "сухому" адгезиву является его способность адаптироваться к шероховатой поверхности [13, 18]. "Ворсинки" с высоким характеристическим отношением очень податливы в поперечном направлении (при изгибе) по сравнению с продольным (при сжатии). Уменьшение угла наклона "ворсинок" α еще больше повышает их податливость в поперечном направлении, делая ее преобладающей. Это помогает обеспечивать межмолекулярный контакт "ворсинок" с неровной поверхностью, а также понижает нагрузку, необходимую для обеспечения такого контакта. На рис. 5 схематически изображена адаптация "сухого" адгезива к твердой поверхности с профилем, описываемым синусоидальной функцией:

$$f(x) = h \sin^2(\pi x / \lambda), \quad (7)$$

где h и λ — высота неровностей и расстояние между ними, соответственно.

Напряжение, которое необходимо приложить к твердому телу для достижения его полного контакта с поверхностью подложки, может быть рассчитано по уравнению [13, 19]

$$\sigma = \frac{\pi E h}{2(1 - \nu^2)\lambda}, \quad (8)$$

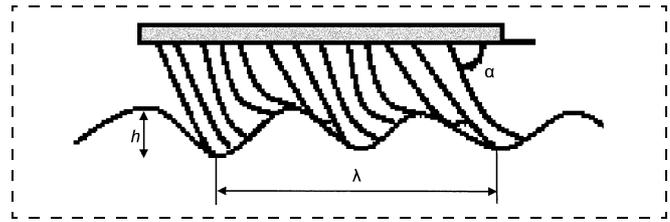


Рис. 5. Схематическое изображение адаптации "ворсинок" "сухого" адгезива к шероховатой поверхности [13]

где E — модуль упругости материала; ν — коэффициент Пуассона материала; h и λ — высота неровностей поверхности подложки и расстояние между ними, соответственно.

Для β -кератина ($E = 4$ ГПа) нагрузка, необходимая для обеспечения контакта с шероховатой твердой поверхностью ($h = 100$ нм и $\lambda = 100$ мкм), составляет 7,4 МПа [13]. Рассчитанная по формуле (8) нагрузка для "сухого" адгезива с "ворсинками", ориентированными под углом $\alpha = 30^\circ$ к поверхности основы ($a = 100$ нм, $L = 300$ мкм, $E = 4$ ГПа и $\gamma_1 = 48,67$ мДж/м²), обеспечивающая контакт с твердой поверхностью подложки, составляет только 3,3 кПа [13]. Очевидно, что формула (8) не учитывает иерархию ориентированных "ворсинок" с постепенно уменьшающимся диаметром на поверхности пальца геккона (см. рис. 1), однако она показывает важную роль модуля упругости материала "ворсинок" в обеспечении контакта "сухих" адгезивов с шероховатой поверхностью подложки.

Зависимость нагрузки, необходимой для обеспечения контакта двухуровневой модели "сухого" адгезива с поверхностью подложки, от угла наклона "ворсинок" α при различной высоте неровностей поверхности показано на рис. 6 [13]. Умень-

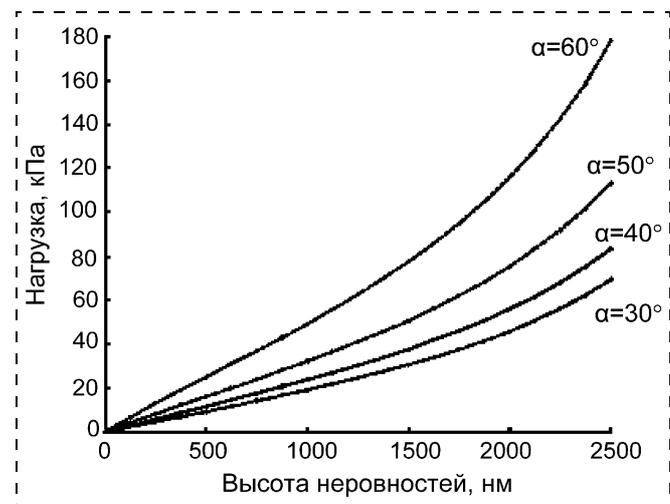


Рис. 6. Зависимости расчетной нагрузки, необходимой для обеспечения контакта, от высоты неровностей поверхности при различном угле наклона "ворсинок" [13]

шение угла наклона α при заданной шероховатости поверхности приводит к понижению такой нагрузки, что подразумевает лучшую адаптацию к неровной поверхности.

После обеспечения контакта "ворсинок" с поверхностью приложенная предварительная нагрузка снимается, и прочность сцепления "сухого" адгезива с подложкой, принимаемая равной адгезионному давлению, рассчитывается как максимальное усилие, которое выдерживает "сухой" адгезив до отрыва "ворсинок" от поверхности подложки. Очевидно, что адгезионная прочность должна зависеть от шероховатости поверхности подложки. На рис. 7 показаны расчетные зависимости адгезионной прочности двухуровневого "сухого" адгезива от высоты неровностей поверхности подложки

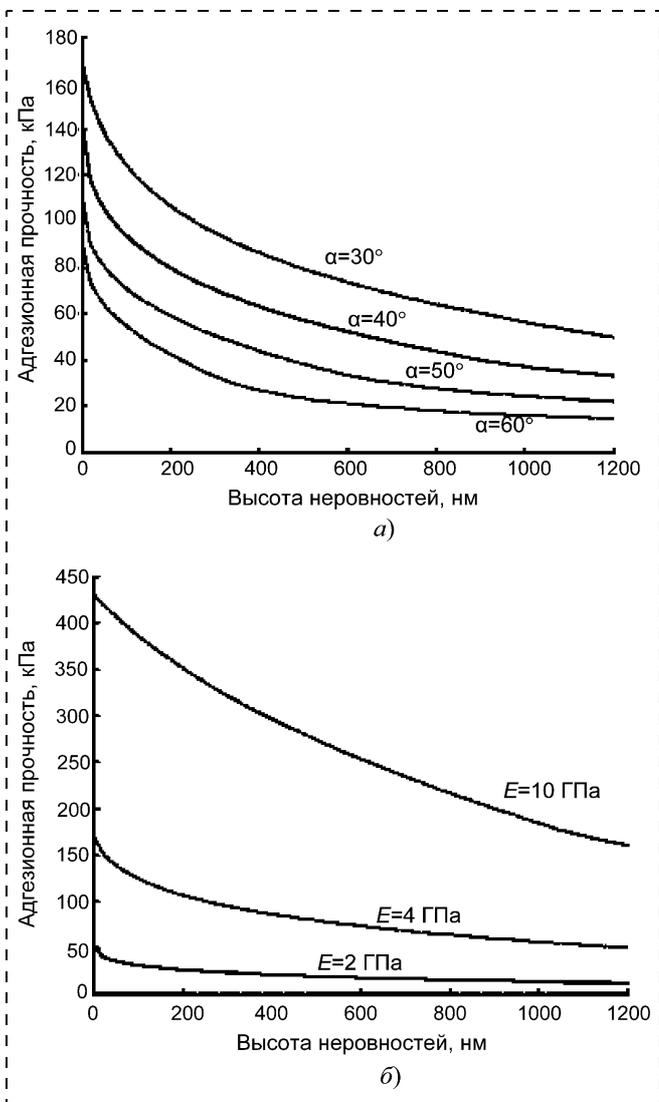


Рис. 7. Зависимости адгезионной прочности от высоты неровностей поверхности подложки при различном угле наклона ворсинок (модуль упругости материала "ворсинок" $E = 4$ ГПа) (а) и при различных модулях упругости материала "ворсинок" (угол ориентации "ворсинок" $\alpha = 30^\circ$) (б) [13]

для различных углов наклона "ворсинок" α (рис. 7, а) и различных модулей упругости E (рис. 7, б) [13]. Зависимости получены для "ворсинок" с $a = 100$ нм, $L = 3$ мкм, $\gamma_1 = 48,7$ мДж/м², $E = 4$ ГПа (рис. 7, а) и $\alpha = 30^\circ$ (рис. 7, б) при расстоянии между неровностями поверхности подложки $\lambda = 100$ мкм. При этом учитывали только ван-дер-ваальсовое взаимодействие и не брали в расчет поперечный изгиб "ворсинок", так как их поперечная жесткость принята значительно меньшей, чем продольная. Из полученных данных видно резко выраженное влияние угла наклона "ворсинок" на силу адгезии. Уменьшение угла наклона "ворсинок" увеличивает площадь контакта "сухого" адгезива с поверхностью. При этом сила адгезии повышается с увеличением модуля упругости материала "ворсинок". Очевидно, что повышение модуля упругости материала "ворсинок" мало влияет на адаптацию "сухого" адгезива к шероховатой поверхности, но позволяет увеличить густоту "ворсинок", что приводит к увеличению адгезии. Таким образом, искусственные "сухие" адгезивы следует изготавливать из достаточно жестких полимеров.

Способность "сухих" адгезивов, как и поверхности пальцев гекконов, к самоочищению от различных загрязнений, сильно понижающих адгезию, в решающей степени определяют возможность их повторного использования в циклах прилипание—отрыв [20]. Феномен самоочищения поверхностей объясняется их сверхгидрофобностью ("эффектом лотоса"): капли воды не растекаются по такой поверхности, а стекают (скатываются) с нее, унося загрязнения [21—23]. "Ворсинки" с достаточно большим характеристическим отношением способны обеспечить сверхгидрофобность поверхности и "эффект лотоса", резко уменьшая долю поверхности, контактирующей с каплями воды и заставляя их скатываться с поверхности. Сверхгидрофобными считаются поверхности, угол смачивания водой которых больше 165° .

Для оценки гидрофобности поверхности с "ворсинками" могут быть использованы уравнения Венцеля [24] или Касси [13, 25], учитывающие влияние шероховатости твердых поверхностей на краевые углы смачивания их жидкостями. В модели Касси принимается во внимание воздух, задерживаемый под каплей, что лучше учитывает особенности смачивания жидкостями поверхности "сухих" адгезивов с "ворсинками", обладающими высоким характеристическим отношением:

$$\cos\theta' = f\cos\theta + f - 1, \quad (9)$$

где θ' и θ — краевые углы смачивания "ворсинок" и плоской поверхности из одного и того же материала, соответственно; f — доля поверхности, покрытой "ворсинками", которая для цилиндриче-

ских "ворсинок" с радиусом a и половиной расстояния между ними w может быть рассчитана по следующему соотношению:

$$f = \pi a^2 / 4(a + w)^2. \quad (10)$$

Формула (9) показывает, что "ворсинки" делают гидрофобные поверхности более гидрофобными, а гидрофильные — более гидрофильными. Таким образом, полимер, выбранный для изготовления "ворсинок", должен быть гидрофобным.

На рис. 8 показаны расчетные зависимости краевого угла смачивания водой θ' от радиуса "ворсинок" для двухуровневой модели "сухого" адгезива при различном модуле упругости материала "ворсинок" [13]. Эти зависимости получены для максимальной плотности "ворсинок", определенной из условия их неслипания (6), при характеристическом отношении $(2a : L)$, равном $1 : 15$, и удельной свободной поверхностной энергии материала "ворсинок" γ_1 , равной $48,7 \text{ мДж/м}^2$. Полученные результаты показывают, что можно создавать сверхгидрофобные "сухие" адгезивы ($\theta' > 165^\circ$), однако при этом "ворсинки" должны иметь диаметр менее 300 нм (при $E > 2 \text{ ГПа}$).

В работе [13] представлены результаты измерений краевых углов смачивания водой трех различных поверхностей одного и того же гидрофобного ПДМСО. Краевой угол смачивания гладкой поверхности оказался значительно меньше, чем поверхностей с "ворсинками" (рис. 9).

Таким образом, для создания искусственных "сухих" адгезивов, обладающих характеристиками, близкими к коже пальцев гекконов, необходимо получить двух- или трехуровневые микро- и/или наноразмерные структуры на поверхности жесткой или эластичной основы, состоящие из регулярно

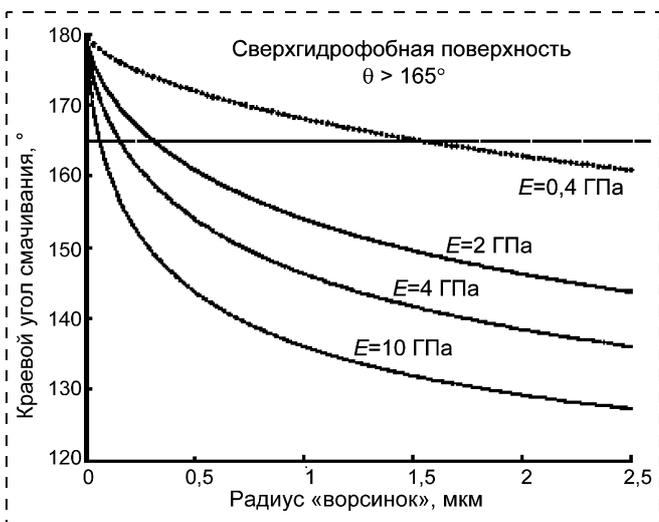


Рис. 8. Зависимость рассчитанного по уравнению Касси краевого угла смачивания водой поверхности от радиуса "ворсинок" [13]

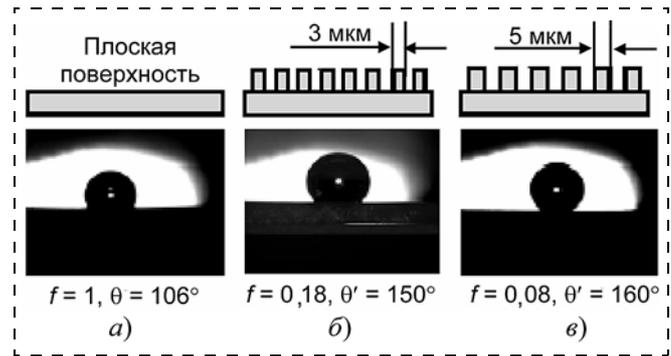


Рис. 9. Микрофотографии и значения краевого угла смачивания водой поверхности ПДМСО: плоской (а) и с "ворсинками" диаметром 3 мкм (б) и 5 мкм (в) [13]

или статистически распределенных плотно упакованных без слипания и спутывания "микроворсинок" диаметром $3 \dots 10 \text{ мкм}$ и/или "нановорсинок" диаметром $200 \dots 500 \text{ нм}$ с характеристическим отношением порядка $1 : (10 \dots 50)$. Материалами для их изготовления могут служить гидрофобные полимеры с высоким модулем упругости (не менее 1 ГПа) и высоким пределом прочности и выносливости при сжатии и изгибе.

Список литературы

1. Aristotle. Historia Animalium. Book IX (trans. Thompson, D. A. W.) 1918. Clarendon. Oxford. (http://clasics.mit.edu/Aristotle/history_anim.html).
2. Sitti M., Fearing R. S. Synthetic gecko foot-hair micro/nanostructures as dry adhesives // Journal of Adhesion Science and Technology. 2003. V. 18. N 7. P. 1055—1074.
3. Sitti M., Fearing R. S. Nanomolding based fabrication of synthetic gecko foot-hairs // Proceedings of the IEEE Nanotechnology Conference. August 2002. P. 137—140.
4. Sitti M., Fearing R. S. Synthetic gecko foot-hair micro/nanostructures for future wall-climbing robots // Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation. September 2003. Taipei. Taiwan. P. 1164—1170.
5. Persson B. N. J. On the mechanism of adhesion in biological systems // The Journal of Chemical Physics. 2003. V. 118. N 16. P. 7614—7621.
6. Autumn K., Sitti M., Liang Y. et al. Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae // Proceedings of the National Academy of Science. 2002. V. 99. N 19. P. 12252—12256.
7. Autumn K., Liang Y., Hsieh T. et al. Adhesive force of a single gecko foot hair // Nature. 2000. V. 405. P. 681—685.
8. Бапаш Ю. С. Силы Ван-дер-Ваальса. М.: Наука, 1988. 344 с.
9. Sun W., Neuzil P., Kustandi T. et al. The nature of the gecko lizard adhesive force // Biophysics Journal. 2005. V. 89. P. 14—17.
10. Arzt E., Gorb S., Spolenak R. From micro to nano contacts in biological attachment devices // Proceedings of the National Academy of Science. 2003. V. 100. N 19. P. 10603—10606.
11. Gao H., Yao H. Shape insensitive optimal adhesion of nanoscale fibrillar structures // Proceedings of the National Academy of Science. 2004. V. 101. N 21. P. 7851—7856.
12. Kesel A. B., Martin A., Seidl T. Adhesion measurements on the attachment devices of the jumping spider Evarcha arcuata // The Journal of Experimental Biology. 2003. V. 206. P. 2733—2738.

13. **Shah G., Sitti M.** Modeling and design of biomimetic adhesives inspired by gecko foot-hairs // Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Biomimetics. August 2004. Shenyang, China. (http://www.me.cmu.edu/faculty/sitti/nano/publications/Gaurav_robio_submit.pdf).

14. **Johnson K. L., Kendall K., Roberts A. D.** Surface energy and the contact of elastic solids // Proceedings of the Royal Society. London. 1971. V. 324. P. 301—313.

15. **Deryagin B. V., Muller V. M., Toporov Yu. P.** Effect of contact deformation on the adhesion of particles // J. Colloid. Interface Sci. 1975. V. 53. P. 314—326.

16. **Hamaker H. C.** The London-van der Waals attraction between spherical particles // Physica. 1937. V. 4. N 10. P. 1058—1072.

17. **Majidi C., Groff R., Fearing R.** Clumping and packing of hair arrays manufactured by nanocasting // Proceedings of IMECE'04 2004 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. November 2004. Anaheim, California, USA. (<http://robotics.eecs.berkeley.edu/~ronf/PAPERS/IMECE2004-62142.pdf>).

18. **Campolo D., Jones S., Fearing R.** Fabrication of gecko foot-hair like nanostructures and adhesion to random rough sur-

faces // Third IEEE Conference. San Francisco. August 2003. V. 2. P. 856—859.

19. **Jagota A., Bennison S.** Mechanics of adhesion through fibrillar microstructure // Integr. Comp. Biol. 2002. V. 42. P. 1140—1145.

20. **Hansen W. R., Autumn K.** Evidence for self-cleaning in gecko setae // Proceedings of the National Academy of Science. 2005. V. 102. N 2. P. 385—389.

21. **Barthlott W., Neinhuis C.** The purity of sacred lotus or escape from contamination in biological surfaces // Planta. 1997. V. 202. P. 1—8.

22. **Barthlott W., Neinhuis C.** Lotus-effekt und Autolack: die Selbstreinigungsprozeß mikrostrukturierter Oberflächen // Biologie in unserer Zeit. 1998. V. 5. P. 314—321.

23. **Neinhuis C., Barthlott W.** Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces // Ann. Bot. 1997. V. 79. P. 667—677.

24. **Киплок Э.** Адгезия и адгезивы: наука технология. Пер. с англ. М.: Мир, 1991. 484 с.

25. **Qurere P., Lafuma A., Bico J.** Slippery and sticky micro-textured solids // Nanotechnology. 2003. V. 14. P. 1109—1112.

УДК 539.216

А. В. Ландышев, канд. техн. наук,
А. А. Лаврентьев, д-р физ.-мат. наук,
В. А. Ландышев,
Донской государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В СПЛАВАХ $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$ И $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,6}\text{Te}_{2,4}$ НА ИХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Исследовано влияние концентрационных неоднородностей в сплавах $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$ и $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,6}\text{Te}_{2,4}$ на их термоэлектрические свойства. Сплавы готовились кристаллизацией из расплава, прессованием порошка с последующим отжигом, экструзией и с применением сверхскоростной закалки из жидкого состояния. Образцы исследовались с помощью методов растровой электронной микроскопии, электронно-зондового микроанализа, кроме того, проводились измерения электрофизических параметров: подвижности, термоЭДС, проводимости, концентрации носителей тока, мощностного параметра $\alpha^2\sigma$. Установлена корреляция между электрофизическими свойствами и электрофизическими свойствами. Выполнены оценки влияния неоднородности в сплавах на их термоэлектрические свойства.

Твердые растворы $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$ и $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,6}\text{Te}_{2,4}$ находят применение в полупроводниковой технике как материалы для термоэлектрических преобразователей, работающих в диапазоне "низких"

температур 280...130 °С. Характерным для этих материалов является существование в них концентрационных неоднородностей, обусловленных особенностями диаграммы состояния Bi_2Te_3 — Bi_2Se_3 и технологическими факторами, что описано в ряде работ [1, 2]. Авторы работ [1, 2] методом локального рентгеноспектрального анализа исследовали влияние технологии приготовления материалов на уровень концентрационных неоднородностей селена и теллура, а также значения термоЭДС и электрической проводимости сплавов $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$ и $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,6}\text{Te}_{2,4}$. При этом показано, что наличие неомогенности приводит к уменьшению значения термоЭДС и влияет на значение электрического сопротивления и термоэлектрической эффективности. Это воздействие объясняется с помощью моделей, в которых материал рассматривался, состоящим из микроскопических участков, обладающих различными значениями термоЭДС, проводимости и теплопроводности [3, 4]. Вместе с тем, в этих работах недостаточно данных, касающихся характера распределения элементов в сплавах и влияния концентрационных неоднородностей на электрофизические свойства (концентрацию и подвижность носителей тока). Авторами также не отмечено возникновение в объеме материала областей преимущественных составов, что, например, имеет место в Si—Ge [5]. Ограниченность объема экспериментальных данных не позволяет сделать более глубоких выводов о влиянии концентрационных неоднородностей на электрофизические свойства. Несмотря на широкое практическое применение указанных материалов, в послед-

нее время практически отсутствуют публикации, посвященные данному вопросу.

В настоящей работе авторами проведены количественные измерения концентрационных неоднородностей, электропроводности, концентрации носителей тока, подвижности и термоЭДС сплавов $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$ и $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,6}\text{Te}_{2,4}$, приготовленных различными способами, с целью получения дополнительных сведений о механизме их гомогенизации и влиянии неоднородностей на электрофизические свойства. Для этого использовался количественный электронно-зондовый микроанализ материала в большом числе (~200—300) случайных точек на поверхности образца, с последующей статистической обработкой результатов измерений, аналогичной применяемой, например, в работах [5, 6].

Электронно-зондовые исследования проводили на рентгеновском микроанализаторе MAP-3, оснащенной системой компьютерной обработки результатов измерений интенсивности характеристического рентгеновского излучения, и растровом электронном микроскопе BS-300. Количественный анализ проводился по основным компонентам с использованием в качестве эталонов бинарных соединений Bi_2Te_3 и Bi_2Se_3 стехиометрического состава по ZAF-методике [7].

Статистическая обработка включала нахождение закона распределения измеренных концентраций, расчет математического ожидания, среднего квадратичного отклонения, асимметрии и эксцесса. Для нахождения закона распределения частичный интервал выбирали равным 4 отн. %, что соответствует удвоенной, стандартной ошибке рентгеновского микроанализа. В отдельных случаях рентгенографическим способом на дифрактометре ДРОН-3 контролировали преимущественную ориентацию кристаллитов в образцах.

Электрическое сопротивление образцов и концентрацию носителей электрического тока измеряли четырехзондовым способом и по методу Холла, соответственно, при комнатной температуре. ТермоЭДС измерялась в перепаде температуры 60...30 °С. Подвижность определяли расчетным путем из значений концентрации носителей и электрической проводимости. Так как для сплавов $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$ и $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,6}\text{Te}_{2,4}$ характерна преимущественная ориентация кристаллитов, то образцы для исследований вырезали из брикетов и слитков, а затем устанавливали в измерительной ячейке таким образом, чтобы направления электрического тока и теплового потока были направлены параллельно преимущественно ориентированным базисным плоскостям (0001). Электрофизические свойства определяли усреднением результатов измерений на пяти образцах, при этом относительный разброс параметров составлял 2—3 %. На ос-

нове результатов рассчитывались значения мощностного параметра $\alpha^2\sigma$, где α — удельная термоЭДС, σ — удельная проводимость.

Материалы для исследования готовились с применением известных технологий. Ниже представлены технологии и режимы приготовления образцов, которые позволили получить различный уровень концентрационной неоднородности:

1. Высокоскоростная закалка из жидкого состояния с последующим прессованием порошка под давлением $5 \cdot 10^8$ Па при температуре 380 °С и отжигом при 400 °С в течение 50 ч, см. [8].

2. Экструзия порошка, полученного измельчением слитков. Коэффициент вытяжки — 25, температура 370 °С. Отжиг материала при 400 °С в течение 150 ч.

3. Прессование под давлением $5 \cdot 10^8$ Па при температуре 380 °С порошка, полученного измельчением слитков, с последующим перемешиванием порошка и отжигом брикетов при температуре 400 °С в течение 150 ч.

4. Экструзия порошка, полученного измельчением слитков. Коэффициент вытяжки 25, температура 370 °С.

5. Прессование под давлением $5 \cdot 10^8$ Па при температуре 380 °С порошка, полученного измельчением слитков с последующим перемешиванием порошка.

6. Кристаллизация из расплава с последующим охлаждением вместе с печью.

Синтез материалов, прессование, а также их термообработка проводились в среде аргона при давлении, близком к атмосферному.

Как показали исследования, технология изготовления сплава существенно влияет на концентрационную однородность сплава. У образцов, полученных, например, по технологиям 4, 5, 6 наблюдались участки поверхности размером в несколько десятков микрон, обогащенные селеном и обедненные теллуrom. На рис. 1, а представлено типичное изображение участка поверхности сплава $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,6}\text{Te}_{2,4}$, полученного кристаллизацией из расплава, в рентгеновских лучах $\text{SeK}_{\alpha 1}$, на котором видно слоистое распределение селена. Аналогичное распределение селена наблюдали и в образцах состава $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$. Сравнение результатов количественного анализа в различных участках сплавов обоих типов указывает на существование линейной зависимости между содержанием селена и теллура (рис. 1, б). При этом концентрация компонентов соответствует их содержанию в твердых растворах разреза Bi_2Te_3 — Bi_2Se_3 , что указывает на взаимное замещение теллура и селена.

На электронно-микроскопических изображениях микроструктуры изломов у образцов обоих типов (рис. 1, в) отчетливо наблюдаются кристал-

литы, с ориентированными различным образом относительно поверхности плоскостями спайности. При этом базисные плоскости у образцов, полученных по методам 1—5, преимущественно ориентируются перпендикулярно усилию, прикладываемому при прессовании брикетов, или параллельно внутренней поверхности фильеры при экструзии. Исключением является структура изломов литых образцов, которая представляет конгломерат зерен, обладающих слоистой структурой, и ориентированных произвольным образом. Сравнивая слоистое распределение селена на поверхности шлифа (рис. 1, а), микроструктуру изломов (рис. 1, в) и учитывая зависимость содержания селена и теллура в различных участках сплавов (рис. 1, б), можно сделать заключение, что расположение атомов халькогенов согласуется с пространственным положением плоскостей спайности.

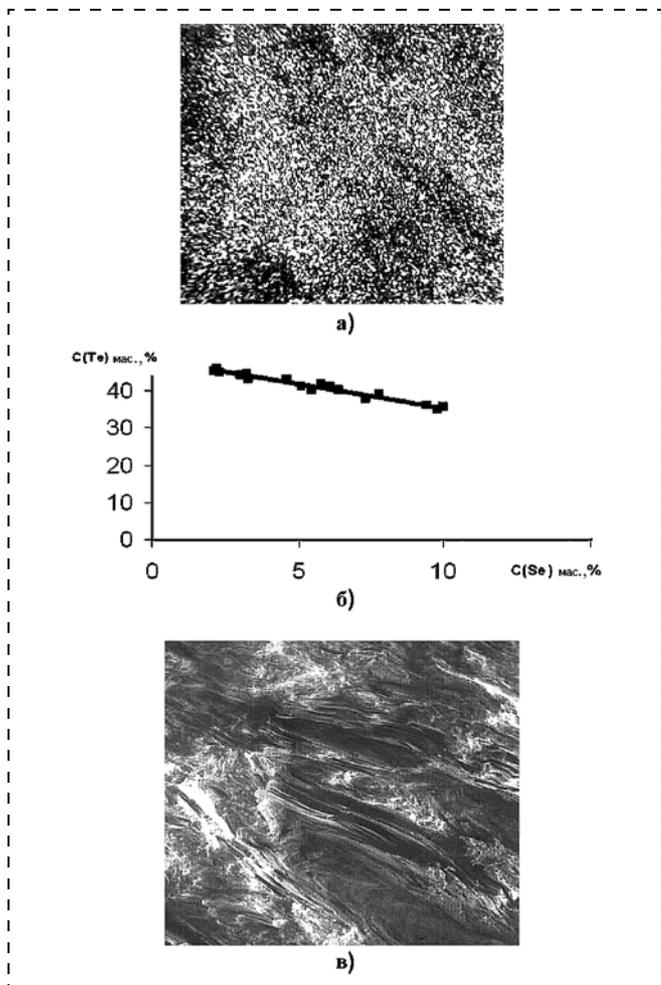


Рис. 1. Микроструктура и замещение селена теллуrom в термоэлектрическом сплаве $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,6}\text{Te}_{2,4}$:

а — изображение участка поверхности сплава в рентгеновских лучах $\text{SeK}_{\alpha 1}$ (масштаб изображения 100×100 мкм); б — корреляция концентрации селена и теллура в различных участках поверхности сплава; в — изображение участка поверхности во вторичных электронах (масштаб изображения 750×650 мкм)

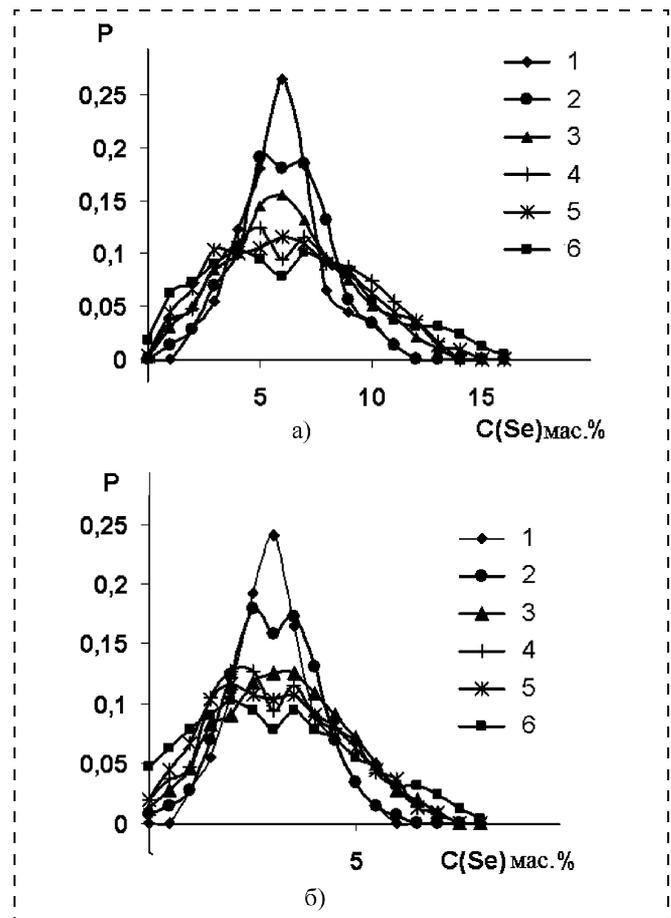


Рис. 2. Гистограммы распределения селена на поверхности сплавов:

а — $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,6}\text{Te}_{2,4}$; б — $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$ (1 — высокоскоростная заковка из жидкого состояния; 2 и 4 — экструзия порошка с последующим отжигом полученного материала и без отжига, соответственно; 3 и 5 — прессование с последующим отжигом полученных брикетов и без него, соответственно; 6 — кристаллизация из расплава)

В связи с наличием однозначной зависимости между концентрациями халькогенов в различных участках сплавов для оценки их однородности достаточно было найти законы распределения одного химического элемента. В качестве такого элемента был выбран селен, так как он измерялся с меньшей, чем теллур, абсолютной ошибкой. Законы распределения концентрации селена в образцах существенно зависят от технологии изготовления материала (рис. 2, а, б). В таблице приведены значения среднего квадратичного отклонения s , асимметрии A_s и эксцесса E_k для обоих составов в зависимости от технологии изготовления.

Из приведенных на рис. 2 кривых видно, что математическое ожидание у всех образцов совпадает с введенным содержанием селена. Используемые технологические методы дают широкий разброс концентрационной неоднородности. Распределение содержания селена приближается к

Параметры распределения содержания селена в сплавах $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$ и $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,6}\text{Te}_{2,4}$

| Технология приготовления | $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$ | | | $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,6}\text{Te}_{2,4}$ | | |
|--------------------------|---|-------|-------|---|-------|-------|
| | Параметры распределения | | | | | |
| | s | E_K | A_s | s | E_K | A_s |
| 1 | 0,93 | -0,14 | 0,23 | 1,32 | -0,18 | 0,25 |
| 2 | 1,05 | -0,24 | -0,05 | 2,16 | -0,28 | 0,22 |
| 3 | 1,35 | -0,47 | 0,117 | 2,58 | -0,52 | 0,26 |
| 4 | 1,41 | -0,68 | 0,213 | 2,72 | -0,56 | 0,24 |
| 5 | 1,51 | -0,67 | 0,24 | 2,88 | -0,63 | 0,30 |
| 6 | 1,83 | -0,63 | 0,36 | 3,18 | -0,71 | 0,40 |

нормальному (на кривых имеет место один максимум) только у образцов, которые готовили путем скоростной закалки и прессованием порошка с последующим отжигом. Это вероятно связано с тем, что измельчение слитков сплавов до частиц размером в несколько десятков микрометров и последующие их перемешивание и прессование порошка при температуре 380°C , а также отжиг способствуют лучшей гомогенизации материала, чем другие технологические приемы. С этой точки зрения можно объяснить и высокую однородность образцов, полученных из сплавов, синтезированных путем высокоскоростной закалки, так как при этой процедуре образуются мелкодисперсные, равноосные частицы размером $\sim 10\text{--}20$ мкм.

У остальных типов образцов на кривых распределения селена отчетливо наблюдаются два максимума, в основе появления которых очевидно лежат ликвационные явления при кристаллизации в псевдобинарной системе $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{--Bi}_2\text{Se}_3$ с полной взаимной растворимостью компонентов, аналогично тому, что наблюдалось в сплавах Si--Ge [5].

Как видно из таблицы, наиболее высокой однородностью обладают сплавы, синтезированные путем скоростной закалки (технология 1), наименьшей — сплавы, полученные кристаллизацией из расплава (технология 6). Удовлетворительная однородность получается у сплавов, полученных экструзией и прессованием с последующим отжигом (технологии 2, 3). При этом отжиг существенно повышает однородность сплавов, что видно из сравнения квадратичного отклонения для способов изготовления (технологии 2, 4 и 3, 5). Это, по-видимому, обусловлено относительно высокими значениями коэффициентов диффузии селена и теллура при температуре отжига. Однако термообработка не устраняет наличие двух типов зерен с преимущественным содержанием селена при экструзии (технологии 2, 4), вероятно потому, что зерна исходного порошка материала при этих методах получения недостаточно перемешиваются. Очевидно для достижения нормального распределения со-

держания компонентов необходима дальнейшая оптимизация технологических режимов.

С уменьшением однородности происходит рост по модулю эксцесса и асимметрии. Значительные отрицательные значения эксцесса обусловлены наличием двух пиков на кривых распределения селена. Положительная асимметрия связана очевидно с более низкими значениями коэффициентов диффузии селена и теллура при температурах кристаллизации.

На рис. 3, а, б представлены зависимости подвижности μ , удельной термоЭДС α , удельной про-

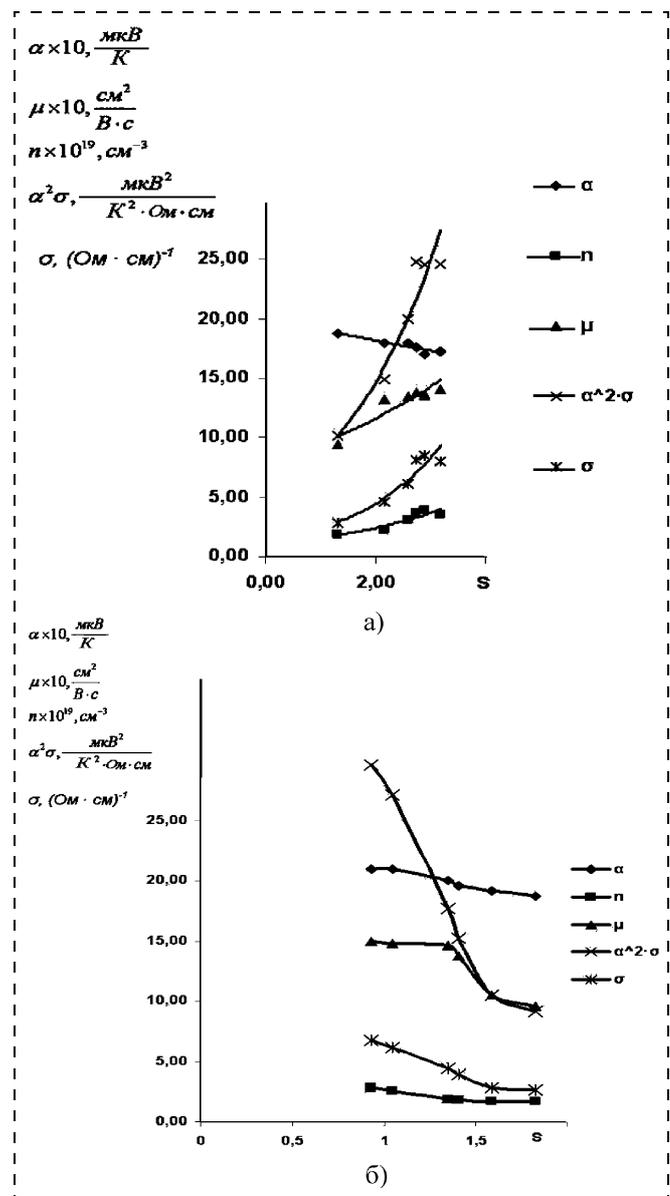


Рис. 3. Зависимость электрофизических свойств (α — удельные термоЭДС, σ — удельная проводимость; n — концентрация носителей тока; μ — подвижность; $\alpha^2\sigma$ — параметр мощности сплавов от их концентрационной неоднородности:

а — $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,6}\text{Te}_{2,4}$; б — $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$

водимости σ , концентрации носителей тока n , параметра мощности $\alpha^2\sigma$ от значения среднего квадратичного отклонения s содержания селена для сплавов $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,6}\text{Te}_{2,4}$ и $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$ соответственно. Видно, что между электрофизическими свойствами и уровнем концентрационной однородности существует достаточно четкая связь. Так для состава $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$ рост неоднородности сопровождается снижением всех электрофизических свойств. В то же время для сплава $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,6}\text{Te}_{2,4}$ наблюдается рост проводимости, подвижности, концентрации носителей и параметра мощности при одновременном уменьшении термоЭДС.

Однозначная интерпретация полученных данных представляется весьма затруднительной в силу одновременного воздействия ряда факторов, влияющих на электрофизические свойства. К ним кроме концентрационных неоднородностей следует отнести различные типы структурных дефектов и анизотропию свойств кристаллов, которая обусловлена структурой кристаллической решетки (гексагональная элементарная ячейка с параметрами: $a = 0,43835$ нм и $c = 3,0487$ у соединения Bi_2Te_3). Для объяснения полученных данных были выполнены расчеты эффективных значений термоЭДС и проводимости гетерогенных материалов по известным методикам, предложенным в работах [3, 4]. Для этого использовались экспериментальные законы распределения селена, полученные в настоящей работе, и электрофизические свойства сплавов в зависимости от состава, взятые из литературы. Так как теплопроводность слабо зависит от содержания селена (относительные изменения составляют не более 3 %), то при вычислениях она принималась за постоянную величину.

Расчеты показали, что повышение неоднородности сплава $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,6}\text{Te}_{2,4}$ должно приводить к снижению термоЭДС и проводимости. Так, максимальное снижение α с ростом неомогенности составляет 3,5 отн. % для изотропного материала и 10 отн. % для слоистого, в то время как измерения дают максимальное снижение ЭДС на 8,5 отн. % (рис. 3, а). Это говорит о том, что основной причиной уменьшения электродвижущей силы являются концентрационные неоднородности материала, обладающего слоистой микроструктурой (см. рис. 1, в). Максимальное расчетное уменьшение проводимости не превышает 16 отн. %, в то время как измерения показали увеличение σ в 2,6 раза. По нашему мнению, это указывает на то, что физические модели, которые лежат в основе расчета проводимости, не учитывают воздействия всего комплекса структурных дефектов в материале.

Значительное расхождение измеренных и расчетных значений проводимости с ростом среднего квадратичного содержания селена можно качественно связать с одновременным воздействием двух структурных факторов: более мелким размером зерен у более однородных сплавов и меньшим уровнем текстурирования материала. Малый размер зерен и соответственно большая поверхность межзеренных границ должны снижать проводимость так же как и уменьшение доли преимущественно ориентированных кристаллитов. В пользу первого фактора косвенно указывает характер распределения селена в образцах, второй подтверждается результатами рентгенографических исследований. Так, доля текстуры кристаллографических плоскостей (006) от поверхности, параллельной направлению электрического тока, при измерении у образцов, полученных скоростной закалкой, составляет 2,3, в то время как у образцов, полученных кристаллизацией, доля текстуры равна 5,2. Это приводит к росту подвижности носителей тока в неоднородных сплавах.

Рассматривая ход электрических характеристик сплавов в зависимости от способа приготовления, можно предположить, что изменение концентрации носителей тока вызвано перераспределением атомов халькогенов в различных кристаллографических положениях. При этом увеличение концентрации носителей приводит к снижению термоЭДС материала, что согласуется с литературными данными, см. например [1]. Рост проводимости происходит вследствие увеличения концентрации носителей тока и подвижности.

Ход проводимости и термоЭДС в зависимости от технологии обуславливает увеличение мощностного параметра $\alpha^2\sigma$ с ростом неоднородности. Видно, что для 4–6-го способов приготовления $\alpha^2\sigma$ достигает максимума и равен $25,3 \cdot 10^6$ мкВ²/(К²·Ом·см). То есть высокий уровень концентрационной однородности данного материала не является определяющим для получения высокой термоэлектрической эффективности, вероятно для этого в большей степени требуется совершенство микроструктуры материала. Это подтверждается известным экспериментальным фактом, заключающимся в том, что наиболее высокая термоэлектрическая эффективность для указанного материала получается на монокристаллах.

Для сплавов $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$ наблюдается хорошее согласование измеренных и расчетных значений изменения термоЭДС в зависимости от технологии изготовления. Эксперимент показывает, что у образцов, полученных высокоскоростной закалкой и кристаллизацией из расплава, увеличение неомогенности сопровождается уменьшением α на 11 %.

В то же время расчетные изменения значений относительного уменьшения термоЭДС в результате негомогенности для изотропной и слоистой структур соответственно равны 2,4 и 9 %. То есть изменение электродвижущей силы, так же как и в сплаве $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,6}\text{Te}_{2,4}$, можно связать с существованием слоистых концентрационных неоднородностей.

Рассматривая совокупность физических свойств сплавов $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$, можно заметить несогласованность хода α и концентрации носителей тока (термоЭДС и концентрация носителей n одновременно уменьшаются). Это, по-видимому, обусловлено тем, что, как следует из результатов электронно-зондового анализа, в материале $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$ с высоким уровнем неоднородности существует большая доля зерен с концентрацией селена равной нулю (см. рис. 2, а, б) и, вероятно, обладающими смешанным типом проводимости. Увеличение доли этих зерен должно приводить к одновременному уменьшению термоЭДС и концентрации носителей тока. Это предположение косвенно подтверждается литературными данными и результатами эксперимента. Как следует из данных расчета произведения $\mu(m^*/m_0)^{3/2}$, где μ — подвижность; m^* — эффективная масса носителей тока; m_0 — масса электрона, наличие смешанной проводимости приводит к снижению подвижности с уменьшением термоЭДС, что наблюдается в эксперименте [1, 9]. Одновременное падение подвижности и концентрации носителей соответственно приводят к снижению проводимости.

Максимальное расчетное относительное уменьшение проводимости в результате снижения однородности для сплава $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$ составляет 11 %, а полученное в результате эксперимента уменьшение — в 3 раза. Это указывает на то, что главным фактором, воздействующим на проводимость материала, как и в предыдущем случае, является комплекс структурных дефектов: межзельные атомы, дислокации, дефекты упаковки, границы зерен и двойников.

Расчет мощностного параметра $\alpha^2\sigma$ для сплавов, полученных разными способами, показывает, что повышение концентрационной однородности и более совершенная микроструктура материала $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$ способствуют повышению его значения до $29,6 \cdot 10^6$ ($\text{мкВ}^2/\text{К}^2 \cdot \text{Ом} \cdot \text{см}$).

Заключение

1. Исследовано влияние технологии изготовления полупроводниковых сплавов $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,6}\text{Te}_{2,4}$ и $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$ на их термоэлектрические свойства и концентрационную неоднородность сплавов.

Показано, что наиболее высокую гомогенность обеспечивает высокоскоростная закалка из жидкого состояния с последующим прессованием и отжигом при 400 °С. Удовлетворительная однородность получается также методами экструзии и прессованием порошка с последующей термообработкой.

2. Показано существование корреляции между концентрационной неоднородностью и электрофизическими свойствами. Установлено, что уменьшение термоЭДС обусловлено ростом концентрационных неоднородностей, а снижение проводимости — частично увеличением неоднородности сплавов и количества структурных дефектов. При этом мощностной параметр $\alpha^2\sigma$ для сплава $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$ достигает максимума для сплавов, полученных высокоскоростной закалкой из жидкого состояния с последующим прессованием и обладающих наибольшей однородностью. Для сплава $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,6}\text{Te}_{2,4}$, полученного экструзией порошка, (технология 4) мощностной параметр $\alpha^2\sigma$ принимает максимальное значение при значительной концентрационной неоднородности.

Список литературы

1. Гольцман Б. М., Кудинов В. А., Смирнов И. А. Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе Bi_2Te_3 . М.: Наука, 1972.
2. Гарцман К. Г., Дедегкаев Т. Т., Бараш А. С., Парпаров Е. З., Гольцман Б. М. Концентрационные неоднородности в сплавах $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$ и $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,6}\text{Te}_{2,4}$ // Изв. АН СССР. Сер. Неорганич. материалы. 1977. Т. 13. № 7. С. 1210—1217.
3. Айрапетянц С. В. Термоэлектродвижущая сила и добавочная теплопроводность статистической смеси // Журнал технической физики 1957. Т. XXVII. С. 479—483.
4. Кудинов В. А., Мойжес Б. Я. Эффективные термоэлектрические свойства для различных типов неоднородностей // ФТТ. 1965. Т. 7. С. 2309.
5. Ландышев А. В., Лаврентьев А. А., Ландышев В. А. Исследование концентрационных неоднородностей в сплавах $\text{Si}_{0,68}\text{Ge}_{0,32}$ // Микросистемная техника. 2004. № 9. С. 4—8.
6. Ландышев А. В., Селиверстенко С. И., Швангирдзе Р. Р. Влияние фазового состава сплавов на параметры гистограмм результатов рентгеноспектрального микроанализа // Журнал аналитической химии. 1985. Т. 40. Вып. 2. С. 258—262.
7. Физические основы рентгеноспектрального, локального анализа: Пер. с англ. / Под ред. И. Б. Боровского. М.: Наука, 1973. 269 с.
8. Глазов В. М., Ятманов Ю. В. Термоэлектрические свойства полупроводниковых твердых растворов $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,6}\text{Te}_{2,4}$ и $\text{Bi}_2\text{Sb}_{1,48}\text{Te}_{1,53}$ // Изв. АН СССР. Сер. Неорганические материалы. 1986. Т. 22. № 1. С. 36—40.
9. Лукьянова Л. Н., Кутасов В. А., Константинов П. П. Эффективная масса и подвижность твердых растворов $p\text{-Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3 - y\text{Se}_y$ // ФТТ. 2005. Т. 47. Вып. 2. С. 224—228.

УДК 537.226.4

А. М. Лотонов, В. К. Новик, Н. Д. Гаврилова,
МГУ им. М. В. Ломоносова, e-mail:
novikmp@org.ru

О ДИСПЕРСИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКА ТРИГЛИЦИНСУЛЬФАТА (ТГС) В ШИРОКОЙ ОБЛАСТИ ТЕМПЕРАТУР

Излагаются результаты исследования диэлектрической дисперсии сегнетоэлектрика триглицинсульфата (точка Кюри $T_K = 49,15$ °С) в диапазоне частот $10^{-3} \dots 10^7$ Гц и температур $-155 \dots 90$ °С. В параэлектрической фазе дисперсия отсутствует или крайне мала. В предпереходной зоне ($T_K + 0,3$) °С отмечено появление дисперсии, которая в своей классической форме формируется только при $T = T_K$. Возникшая доменная структура рассматривается как доминирующая причина дисперсии. В высокочастотной области ее вклад связывается с колебаниями доменной стенки, в низкочастотной — и с образованием новых доменов, т. е. с процессами переполяризации в малых полях. В области сверхнизких частот отмечено проявление вклада в дисперсию собственной электропроводности, особенно повышенного в парафазе и точке Кюри. При $T \approx T_K$ на частотах $< 10^{-1}$ Гц наблюдалось образование запорного слоя, снижающего измеряемое значение диэлектрической проницаемости образца на два порядка.

Поведение диэлектрической проницаемости классического сегнетоэлектрика триглицинсульфата (ТГС) в области температуры Кюри изучено достаточно полно в области средних частот. В меньшей степени исследована диэлектрическая дисперсия этого монокристалла, особенно в области инфранизких частот. Причина проста — отсутствие до недавних пор автоматизированных средств проведения таких, крайне трудоемких, исследований. Появление этих средств — автоматизированных спектрометров с программируемой стабилизацией температуры образцов — позволяет проследить сочленение на непрерывной частотной шкале двух процессов, обусловленных реакцией сегнетоэлектрика на малое внешнее поле: 1) индуцирования поляризации в сложившейся доменной структуре; 2) зарождения и развития новых сегнетоэлектрических доменов. Частотная ($10^{-3} \dots 10^7$ Гц) дисперсия является индикатором их процессов.

Экспериментальные результаты

В исследованиях использовался спектрометр "Novocontrol "Concept 40", с полосой частот $10^{-3} \dots$

$2 \cdot 10^7$ Гц, измеряющий в интервале $T = 120 \dots 650$ К значение комплексной диэлектрической проницаемости

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' = C_p^*/C_0, \quad \text{tg}(\delta) = \varepsilon''/\varepsilon';$$

где C_p^* — комплексное значение измеренной емкости образца; C_0 — значение емкости вакуума в объеме образца.

Спектрометр определяет комплексное значение диэлектрической проницаемости по соотношениям амплитуд и фаз напряжения, приложенного к образцу, и тока, протекающего через образец.

Суммарная погрешность измерения указанных величин не превышала 5 % их абсолютного значения.

В отличие от предшествующих работ [1, 2, 3], где конечные кривые формировались стыковкой зависимостей, измеренных одновременно и на отдельных, применительно к частотному диапазону, приборах, зависимости, полученные нами в одном экспериментальном сеансе, отражают единое текущее состояние образцов.

Исследовались высокосовершенные образцы ТГС полярного Y-среза, диаметром 12 мм и толщиной 2,6...2,7 мм, с напыленными серебряными электродами. Значения $\varepsilon'_{22}(f)$ и $\varepsilon''_{22}(f)$ определялись в поле с амплитудой $1 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$. Для получения целостной картины общих закономерностей $\varepsilon'_{22}(f)$ и $\varepsilon''_{22}(f)$ измерения проводились при понижении температуры от $T = 90$ °С. Поведение $\varepsilon'_{22}(f)$ и $\varepsilon''_{22}(f)$ в сегнетофазе было изучено до $T = -155$ °С.

Обсуждение экспериментальных результатов

Температурная зависимость диэлектрической проницаемости ТГС по полярной оси Y, измеренная во внешнем поле, изучена от 4,2 К [1], ее дисперсия исследована в интервале $10^3 \dots 10^8$ Гц от 78 К [2] и в интервале $10^0 \dots 10^{13}$ Гц — около 20 °С [3]. Вблизи температуры Кюри ($T_K \pm 0,5$ °С) дисперсия была изучена рядом авторов по собственным шумам образцов [4].

Предшествующие исследования дисперсии в интервале $10^{-3} \dots 10^7$ Гц для $T > T_K$ авторам неизвестны.

Представленные результаты (рис. 1, 2) дополняют исследования [2, 3] и расширяют их как в сторону малых (до 10^{-3} Гц) частот, так и по температуре.

Рис. 1, 2 показывают зависимости $\varepsilon'_{22}(f)$ и $\varepsilon''_{22}(f)$ в системе СИ при изменении частоты на десять порядков в пара- (рис. 1) и сегнетофазах (рис. 2). На каждой из кривых $\varepsilon'_{22}(f)$ качественно выделяются два частотных участка выше и ниже ≤ 1 Гц. Выше этого условного порога зависимости $\varepsilon'_{22}(f)$ и $\varepsilon''_{22}(f)$ могут рассматриваться как характеризующие только объемные свойства, ниже — включаются механизмы приэлектродных эффектов.

Общее сравнение дисперсии в пара- и сегнетофазах. Нетрудно видеть, что в парафазе, вплоть до непосредственной близости к фазовому переходу (по градуировке прибора $T_K = 49,15 \text{ }^\circ\text{C}$), при законо-

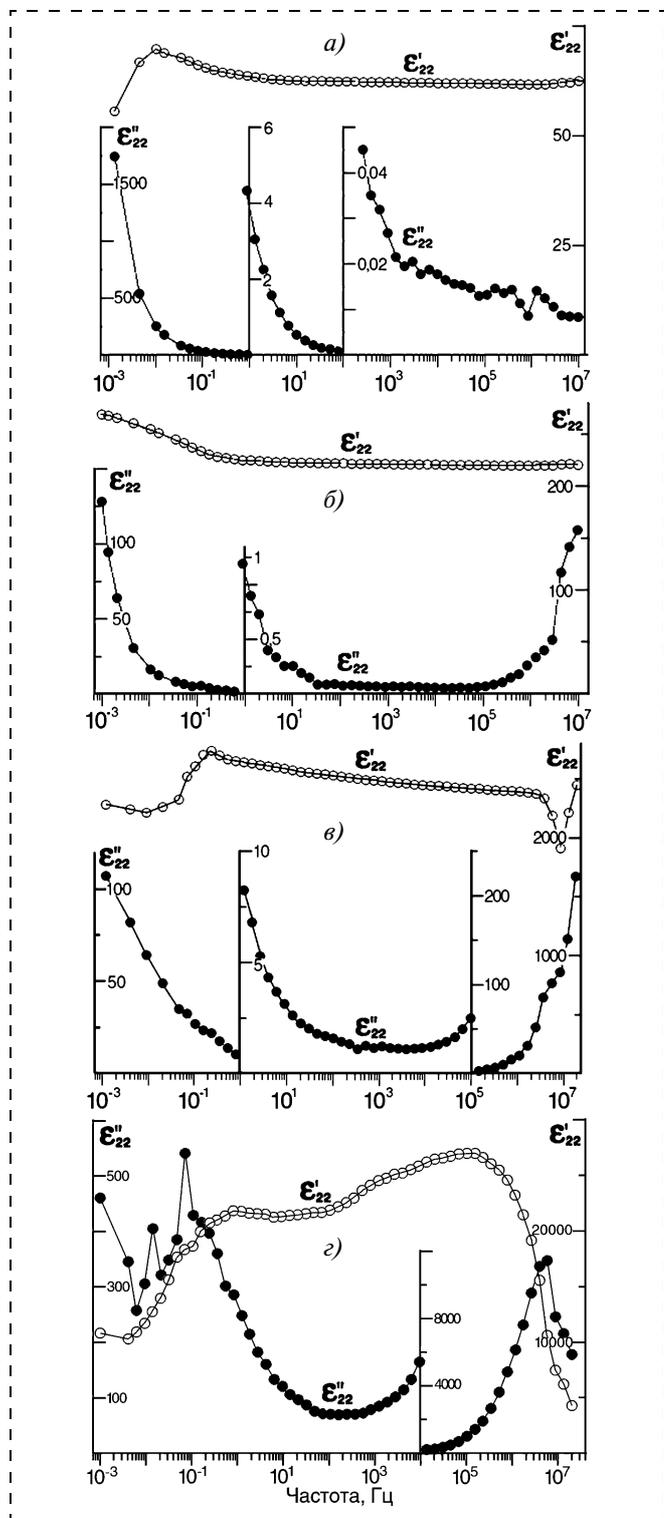


Рис. 1. Зависимости $\epsilon'_{22}(f)$ и $\epsilon''_{22}(f)$ совершенного монокристалла ТГС в параэлектрической фазе при $T = 90 \text{ }^\circ\text{C}$ (а), $T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ (б), $T = 50,4 \text{ }^\circ\text{C}$ (в) и $T = 49,35 \text{ }^\circ\text{C}$ (з)

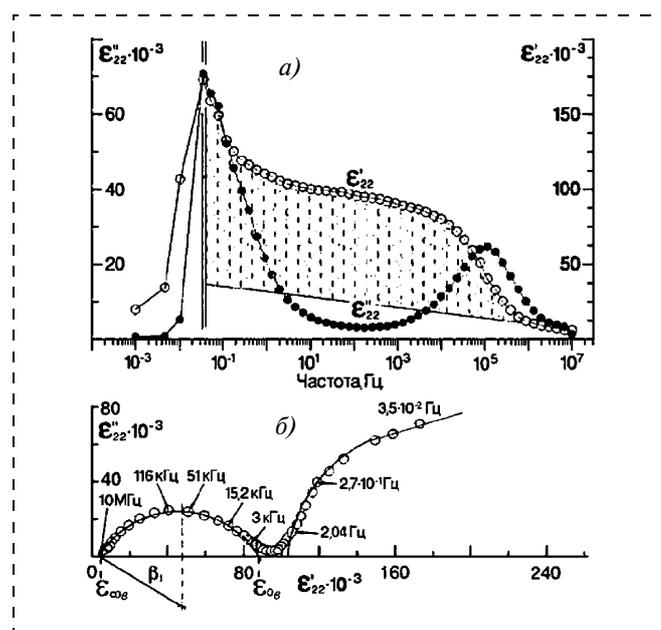


Рис. 2. Зависимости $\epsilon'_{22}(f)$ и $\epsilon''_{22}(f)$ (а) и вид соотношения $\epsilon''_{22}(\epsilon'_{22})$ (б) совершенного монокристалла ТГС в сегнетоэлектрической фазе при $T = 49,04 \text{ }^\circ\text{C}$

мерном увеличении диэлектрической проницаемости дисперсия $\epsilon'_{22}(f)$ в изученном частотном интервале или отсутствует (рис. 1, а, б) или крайне мала (рис. 1, в).

Характерным свойством дисперсии в парафазе является слабое монотонное снижение значений ϵ'_{22} с увеличением частоты. Диэлектрические потери, как легко видеть из соотношений $\epsilon'_{22}(f)$ и $\epsilon''_{22}(f)$ также весьма малы и значение $\text{tg}\delta$ не превышает 0,1 (см. рис. 1, в, $T = 50,4 \text{ }^\circ\text{C}$, 20 МГц). Даже при повышенной температуре (см. рис. 1, а, $T = 90 \text{ }^\circ\text{C}$) монокристалл остается высокочастотным ($\text{tg}\delta = 0,003$ на $f = 1 \text{ кГц}$) диэлектриком, не проявляющим дисперсии. Соответственно и соотношения $\epsilon''_{22}(\epsilon'_{22})$ не указывают на доминирующую роль какого-либо колебательного мотива. Существенная дисперсия даже при $(T_K + 0,5) \text{ }^\circ\text{C}$ начинается лишь с частот свыше 10^8 Гц [4]. В нашем частотном диапазоне она отмечается лишь при $T_K + 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 1, з).

Зона $(T_K + 0,2) \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow T_K$ является областью метастабильного поведения зависимостей $\epsilon'_{22}(f)$ и $\epsilon''_{22}(f)$. Рис. 1, з ($49,35 \text{ }^\circ\text{C}$) дает представление об аномальной дисперсии в этой зоне [$\epsilon'_{22}(f)$ возрастает с повышением частоты].

Поскольку не исключено, что зависимость отражает изменение состояния образца за время измерения (2,5 ч) при строгой ($\approx 0,01 \text{ }^\circ\text{C}$) стабилизации температуры, эти данные не могут стать предметом анализа. Если же рассматривать высокочастотный спад $\epsilon'_{22}(f)$ как порог дисперсии при этой

температуре, то для пика $\varepsilon''_{22}(f=5,7 \text{ МГц})$ постоянная времени некоего колебательного мотива, рассчитанная по совокупной подгонке по обеим кривым $\varepsilon'_{22}(f)$ и $\varepsilon''_{22}(f)$ составляет $\tau = 0,06 \text{ мкс}$. Очевидная малость постоянной времени релаксации соответствует, возможно, флуктуациям доменных границ образующихся и исчезающих полярных областей ("мигающие диполи") в состоянии, предшествующем фазовому переходу. Но какие-либо весомые обсуждения поведения $\varepsilon'_{22}(f)$ и $\varepsilon''_{22}(f)$ в этой узкой температурной зоне могут быть проведены только после детального дополнительного исследования.

В полярной сегнетофазе кристалл в соответствии с принципом Кюри—Неймана также должен оставаться макроскопически неполярным. Согласно симметрии ТГС при температуре фазового перехода в кристалле возникают домены с антипараллельной ориентацией спонтанной поляризации в сопредельных доменах. Зависимость $\varepsilon'_{22}(f)$ сразу же ($T = 49,04 \text{ }^\circ\text{C}$, рис. 2, а) приобретает четко выраженную дисперсию с классическими соотношениями между $\varepsilon''_{22}(f)$ и $\varepsilon'_{22}(f)$ (рис. 2, б). Иными словами, сильная частотная дисперсия является неотъемлемым признаком полярной фазы собственного сегнетоэлектрика.

Кривые рис. 2, а наглядно демонстрируют реакцию сегнетоэлектрика на внешнее поле различной частоты. Область температуры Кюри позволяет убедительно выделить три частотных области с доминирующими по вкладу в зависимости $\varepsilon'_{22}(f)$ и $\varepsilon''_{22}(f)$ механизмами: 1) область $10^2 \dots 10^7 \text{ Гц}$; дисперсия обусловлена колебанием доменных стенок; 2) область $10^0 \dots 10^2 \text{ Гц}$; дисперсия обусловлена колебанием имеющихся стенок и зарождением новых доменов; 3) область $f < 1 \text{ Гц}$; дисперсия обусловлена колебанием имеющихся стенок, зарождением новых доменов и собственной электропроводностью кристалла.

При других температурах проявление этих механизмов в значительной степени взаимно нивелировано и выражено менее четко.

Сегнетофаза. Частотная область $10^2 \dots 10^7 \text{ Гц}$. Дисперсия, обусловленная колебанием доменных стенок. Кривая зависимости $\varepsilon'_{22}(f)$ заметно снижается в интервале $10^2 \dots 10^5 \text{ Гц}$ и затем при $f \approx 10^6 \text{ Гц}$ наблюдается существенный спад значения ε'_{22} . Для этой же частоты характерен несколько размытый пик $\varepsilon''_{22}(f)$. Вполне удовлетворительное выполнение соотношения Коула—Коула (см. рис. 2, б) свидетельствует о проявлении действия некоторого совокупного колебательного ансамбля с усредненным эффективным временем релаксации $\tau_0 \approx 1,65 \text{ мкс}$ и большим параметром размытия ($\beta = 31^\circ$). Такой ансамбль может быть идентифицирован. Им явля-

ется сетка доменных стенок, отличных по значению, конфигурации и расположению в объеме. Естественно, что их интегральный вклад в абсолютное значение ε'_{22} может характеризоваться только усредненными значениями. Но порядок времени τ_0 соответствует именно колебательным, а не каким-либо другим видам движения уже имеющихся доменных границ.

Многочисленные обсуждения вклада доменной стенки в зависимость $\varepsilon'_{22}(f)$ в указанном интервале частот подытожены в работе [5], где предложена модель, качественно объясняющая особенности поведения как температурных, так и частотных зависимостей диэлектрической проницаемости в сегнетофазе.

Общее значение заряда Q , создаваемого на электродах сегнетоэлектрика в малом внешнем поле, является суммой обычного индуцированного заряда $Q_{\text{инд}}$ и заряда изменения полярного состояния (см. ниже) объема доменных стенок $Q_{\text{дом}}$: $Q = Q_{\text{инд}} + Q_{\text{дом}}$. Отсюда, эффективное значение проницаемости $\varepsilon'_{22} = \varepsilon'_{22\text{инд}} + \varepsilon'_{22\text{дом}}$. Причем в непосредственной близости к T_K значение $\varepsilon'_{22\text{инд}}(f)$ должно быть одного порядка с максимальным значением ε'_{22} в парафазе и такого же частотного характера. Эта зависимость $\varepsilon'_{22\text{инд}}(f)$ вполне приемлемо аппроксимируется прямой линией, исходящей из точки $\varepsilon'_{22\text{инд}} = \varepsilon'_{22\infty}$ (10^7 Гц) по линии зависимости $\varepsilon'_{22}(f)$ или, что то же самое, параллельно полке этой кривой. Заштрихованная область на рис. 2, а показывает вклад $\varepsilon'_{22\text{дом}}(f)$ в суммарное значение ε'_{22} . Нетрудно видеть, что даже при возможной ошибке аппроксимации этот вклад является доминирующим.

Объяснение такого соотношения вытекает из модели [5]. На рис. 3, а, б, в показана граница двух сегнетоэлектрических доменов. Поскольку доменная стенка разделяет области с антипараллельным направлением спонтанной поляризации, то сама граница доменов создается линией кристаллических ячеек с нулевой спонтанной поляризацией в них. Крайние ячейки этой линии ступенчато образуют конечную (в ТГС — округлую) конфигурацию домена. В полярной ячейке домена спонтанная поляризация формируется, в основном, направлением ориентации глицина I. Ориентация обусловлена только тепловой энергией порядка kT . Близкого значения должна быть и энергия реориентации полярного состояния в ячейке доменной стенки, которая происходит с частотой собственных колебаний решетки, так что ячейка усредненно во време-

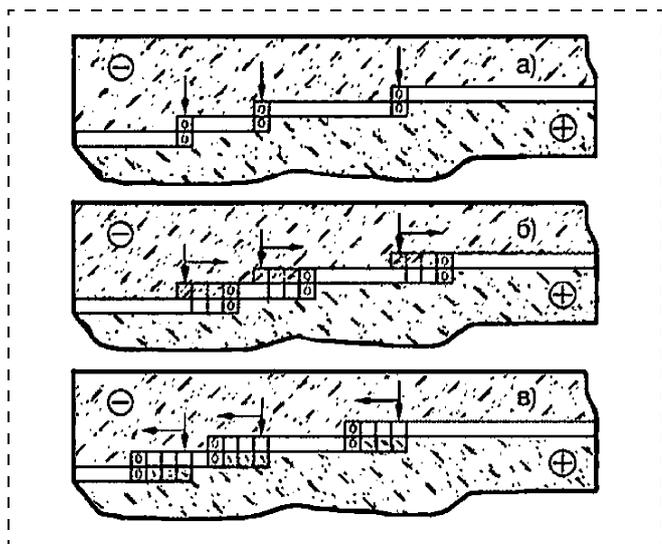


Рис. 3. Механизм движения доменной границы в малом внешнем поле

ни оказывается неполярной. По этой причине малое (даже уровня шумов) электрическое поле, приложенное к этой пограничной ячейке, переводит ее как целое в полярное состояние, делая соседнюю ячейку неполярной, иными словами, переключает ячейки доменной стенки по схеме $0 \rightarrow "+"$ или $0 \rightarrow "-"$, пространственно смещая неполярную ячейку. Применительно же к совокупности (линии) ячеек способы реализации этого механизма существенно отличаются по энергии активации. Энергия активации, необходимая для смещения линии ячеек как целого нормально к ее протяженности (по рис. 3 вверх или вниз), много больше kT . Изменение состояния крайних ячеек линии (на рис. 3, а они указаны стрелками) в то же время требует энергии активации порядка kT [5]. Причина состоит в том, что при этом сохраняется состояние двух связей ячейки из четырех, так что энергетический барьер при переключении ячейки составляет $\Delta U \approx 0,1$ эВ [2] при $kT \approx 0,03$ эВ. Поэтому последовательность дискретных переключений ячеек в малом внешнем поле протекает преимущественно вдоль их линии, что и показано на рис. 3, б, в.

Положение крайних ячеек на исходном фронте доменной стенки в отсутствие внешнего поля дано (см. рис. 3, а) вертикальными стрелками. Приложенное поле за время одного полупериода (рис. 3, б) переключает ячейки, увеличивая площадь "-" поляризации, и смещает фронт доменной стенки вправо. За время полупериода другого знака (рис. 3, в) поле переключает ячейки, увеличивая площадь "+" поляризации, и смещает фронт доменной стенки от исходного положения влево. В этом и состоит механизм высокочастотных смещений (или колебаний)

фронта совокупности отдельных доменных стенок применительно к "малым" переменным полям.

Фронтальные ячейки стенки в первый полупериод переключаются по схеме $0 \rightarrow "-"$, конечные той же линии — по схеме $"+" \rightarrow 0$ (рис. 3, б), что приводит к переключению в одной линии результирующего заряда, пропорционального числу ячеек (в нашем примере — трем) и их дипольным моментам.

Модель дает следующие объяснения существованию высокочастотного порога дисперсии и характеру частотной зависимости $\varepsilon'_{22}(f)$ ниже этого порога. Изменение состояния ячейки сопровождается ее деформацией. И процессу распространения этого изменения в объеме кристалла сопутствует деформация прилегающих ячеек, т. е. диссипация энергии. Соответственно и движение доменной стенки сопровождается деформацией прилегающих ячеек, т. е. появляется механизм рассеяния энергии, отсутствующий в парафазе. По этой причине в сегнетофазе диэлектрические потери выше, чем в парафазе вне зоны флуктуации. В интервале $10^1 \dots 10^4$ Гц при $50,4$ °С (см. рис. 1, в) $\text{tg} \delta \approx 0,001$, при $49,04$ °С (см. рис. 2, а) $\text{tg} \delta \approx 0,05$. С повышением частоты потери растут (см. рис. 2, а, кривая $\varepsilon''_{22}(f)$), проходя через частотный максимум, выше которого в малых полях процесс перемещения стенки резко минимизируется подобно амплитуде колебаний в вязкой среде. Частота этого максимума (дисперсионная граница) определяется только рассеянием энергии.

Падение амплитуды колебаний стенки и соответствующие сокращения числа ячеек, переключаемых за период, проявляется как снижение значения $\varepsilon'_{22}(f)$ и представляет собой первопричину дисперсии сегнетоэлектрика. Значение смещения доменной стенки ниже частотного порога дисперсии ограничивается, в принципе, только размерами образца. Реально, однако, амплитуда колебаний в данном поле определяется дефектами решетки, в первую очередь поверхностными, препятствующими переполаризации фронтальной ячейки. Поэтому вклад стенок в значение $\varepsilon'_{22\text{дом}}$ ниже порога дисперсии в пределах нескольких порядков должен слабо зависеть от частоты, оставаясь пропорциональным числу переключаемых крайних ячеек (общей длине доменных границ [6]) и дипольному моменту ячейки.

Энергия активации, потребная для аннигиляции стенок при их столкновении, составляет много больше kT . Этот барьер для малых полей также служит естественным ограничением амплитуды колебаний стенки.

Зависимость $\varepsilon'_{22}(f)$ на рис. 2, а подтверждает это заключение. При фазовом переходе формиру-

ется максимальное число мелких (~10 мкм) доменов [7], ответственных за предельный ($\epsilon'_{22\text{дом}} \approx 10^5$) вклад стенок в абсолютное значение ϵ'_{22} . Значение же этого вклада остается практически постоянным при понижении частоты на три порядка (участок заштрихованной области на рис. 2, а от $5 \cdot 10^4$ до 10^1 Гц). Такой характер проявления дисперсии является типичным для собственных сегнетоэлектриков, и отмечался, в частности, для ВаТiО₃ [5].

Закономерен вопрос о соотношении значений переключаемого заряда доменной стенки $Q_{\text{дом}}$ и спонтанной поляризации P_s при столь плотной сетке доменов. Оценки дают $Q_{\text{дом}} < 0,5P_s$ для P_s ($T = T_K - 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$) $\approx 5 \cdot 10^{-10}$ Кл·см⁻². В силу многочисленности параметров, влияющих на движение и конфигурацию доменных стенок, сомнительна возможность аналитического описания ее вклада в $\epsilon'_{22}(f)$, что не исключает, однако, качественных заключений.

Движение доменной стенки в малых полях предопределяет ряд следствий:

1. Вариации абсолютных значений диэлектрической проницаемости образцов в сегнетофазе являются следствием временной релаксации доменной структуры к ее стационарному состоянию. Для доменов малых размеров вклад стенок в значение ϵ'_{22} должен быть особенно велик, поскольку формирование малых радиусов требует относительно большего числа крайних ячеек в линии, чем в плоской стенке.

2. Зависимость $\epsilon'_{22}(T)$ в сегнетофазе вблизи T_K принципиально должна претерпевать большие трансформации при измерениях в режиме повышения и понижения температуры, что, в свою очередь, вызывает заметную неопределенность определения температуры фазового перехода по пересечению зависимостей $1/\epsilon'_{22}$ в сегнето- и парафазах. Вместе с тем, констатация появления дисперсии в зависимости $\epsilon'_{22}(f)$ может служить прямым, объективным и однозначным индикатором температуры перехода. Исследование процесса появления дисперсии должно пролить свет также и на природу предпереходных явлений (см. рис. 1, з) [1].

3. Возможность полной переполяризации кристалла в малых полях при продолжительном времени процесса. Предельным случаем является спонтанная монодоменизация образцов в поле, обусловленном разностью химпотенциалов электронов, локализованных на поверхностных состояниях "+" и "-" концов P_s , в преобладающих по площади доменах [2].

Высказанные заключения опосредовано объясняют результаты рис. 4 и 5.

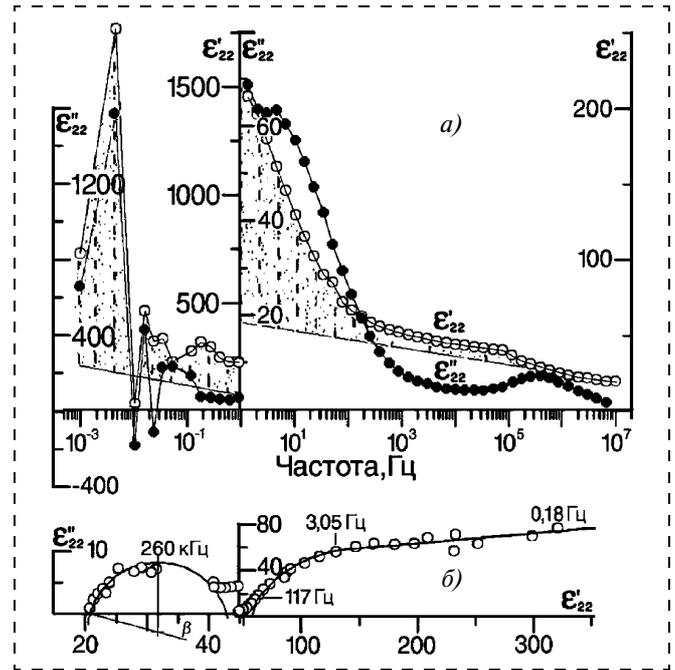


Рис. 4. Зависимости $\epsilon'_{22}(f)$ и $\epsilon''_{22}(f)$ (а) и вид кривой $\epsilon''_{22}(\epsilon'_{22})$ (б) монокристалла ТГС при $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

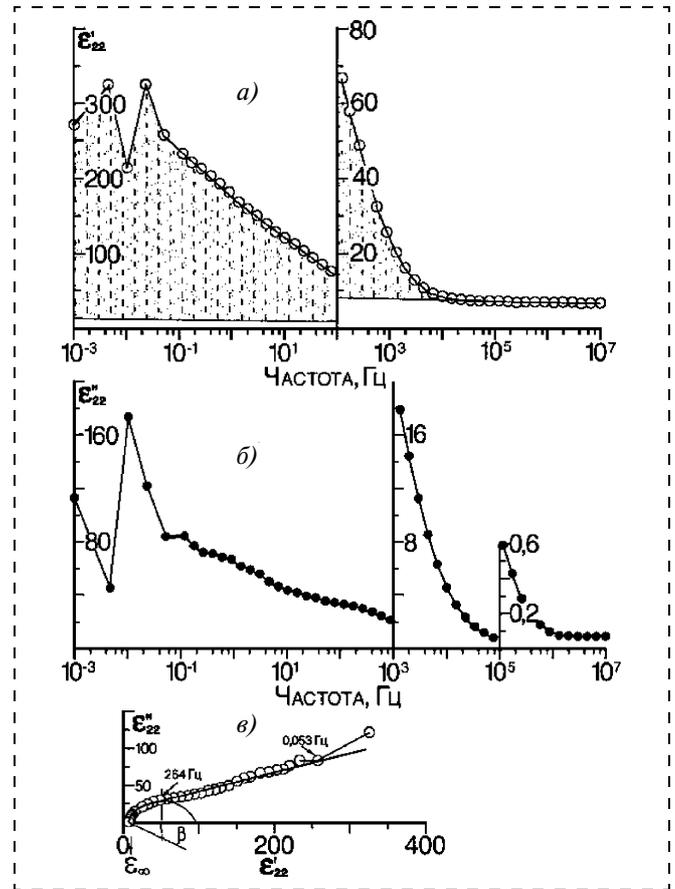


Рис. 5. Зависимости $\epsilon'_{22}(f)$ и $\epsilon''_{22}(f)$ (а) и вид кривой $\epsilon''_{22}(\epsilon'_{22})$ (б) монокристалла ТГС при $T = -155 \text{ }^\circ\text{C}$

Кривые $\varepsilon'_{22}(f)$ и $\varepsilon''_{22}(f)$ при 20 °С (рис. 4, а) качественно подобны зависимостям при 49,04 °С (см. рис. 2). Зависимости $\varepsilon'_{22}(f)$ и $\varepsilon''_{22}(f)$ в интервале $10^3 \dots 10^7$ Гц также взаимосвязаны соотношением Коула—Коула (рис. 4, б), но значение усредненного эффективного времени релаксации несколько больше $\tau_0 \cong 2$ мкс, что отражается в наблюдаемом смещении максимума $\varepsilon''_{22}(f)$ и порога дисперсии $\varepsilon'_{22}(f)$ в сторону низких частот. Угол $\beta_1 \approx 15^\circ$, что свидетельствует о сужении спектра времен релаксации, сравнительно с областью T_K (см. рис. 2, а), или, другими словами, о сокращении числа доменов и типов их конфигураций. Вследствие уменьшения суммарной длины доменной стенки, ее вклад в абсолютное значение $\varepsilon'_{22}(f)$ (рис. 4, а, заштрихованная область) относительно меньше, чем в области фазового перехода, в то время как дипольный момент ячейки вырос в десятки раз. При снижении температуры суммарная длина доменной стенки сократилась на порядки как за счет увеличения размеров одиночных доменов, так и по причине уменьшения их числа, что неоднократно было показано исследованием температурной эволюции доменной топографии. Само абсолютное значение $\varepsilon'_{22}(f)$ в интервале $10^2 \dots 10^5$ Гц, указанное на рис. 4, а, отражает лишь некое промежуточное значение во временном дрейфе к монодоменному состоянию, в котором, например, $\varepsilon'_{22}(10^3 \text{ Гц}) \approx 35$. Постоянная времени такого дрейфа при комнатной температуре составляет для высокосовременных образцов около четырех суток.

Зависимости $\varepsilon'_{22}(f)$ в области 100...210 К лишены типичной особенности, характерной для более высоких температур, — четко выраженного высокочастотного порога дисперсии (рис. 5, а). В интервале $5 \cdot 10^3 \dots 10^7$ Гц значение ε'_{22} постоянно и типично для монодоменных образцов кристаллов [3] при этой температуре. Кривая $\varepsilon''_{22}(\varepsilon'_{22})$ (рис. 5, б) завершает прослеживаемую тенденцию в подавлении дуги соотношений Коула—Коула при снижении температуры (см. рис. 1, б), т. е. угасания вклада в дисперсию сугубо колебательного мотива. Причиной этого является уменьшение суммарной длины доменных стенок при снижении температуры, вследствие укрупнения размеров доменов.

В области $f \leq 5 \cdot 10^3$ Гц начинается монотонное возрастание значения $\varepsilon'_{22}(f)$, имевшее место при $f \leq 5$ Гц для $T = 49,04$ °С (см. рис. 1) и при $f \leq 10^2$ Гц для $T = 20$ °С (см. рис. 1, а). В каждой из этих частотных областей возрастанию $\varepsilon'_{22}(f)$ сопутствует увеличение значения $\varepsilon''_{22}(f)$. Эта общность свидетельствует о проявлении на частотной шкале некоего иного, низкочастотного механизма дисперсии, рассматриваемого ниже.

Несмотря на малый вклад высокочастотной дисперсии (рис. 5, а), постоянную времени релаксации доменной стенки можно определить по частоте пика $\text{tg} \delta$. Ее значение достигает $\tau_0 \approx 455$ мкс. Отсюда ясно, что порог высокочастотной дисперсии сливается с границей начавшего проявляться низкочастотного механизма.

Рост постоянной времени релаксации доменной стенки при понижении температуры ($T = 49,04$ °С — $\tau_0 \cong 1,65$ мкс; $T = 20$ °С — $\tau_0 \cong 2$ мкс; $T = -155$ °С — $\tau_0 \approx 455$ мкс), ранее детально изученный в работе [2], отражает принципиальную основу механизма колебаний доменной стенки — релаксацию тепловой ориентационной поляризации, которая зависит от температуры в соответствии с классическим соотношением

$$f_{\text{рел}} = \nu_0 \exp(-\Delta U/kT), \quad (1)$$

где ΔU — потенциальный барьер, преодолеваемый диполем при реверсировании; k — константа Больцмана; ν_0 — константа. Наши данные в координатах $\lg f_{\text{рел}}(10^3 \cdot T_1)$ дополняют прежние исследования [2] и ложатся на прямую, вытекающую из соотношения (1).

Сегнетофаза. Низкочастотная область. Дисперсия, обусловленная зарождением новых доменов. Кривые $\varepsilon'_{22}(f)$ и $\varepsilon''_{22}(f)$ в этой частотной области качественно одинаковы, но существенно отличаются количественно — граничной частотой формирования области (при $f \leq 5$ Гц для 49,04 °С (см. рис. 2), при $f \leq 10^2$ Гц для 20 °С (см. рис. 4) и при $f \leq 5 \cdot 10^3$ Гц для -155 °С (см. рис. 5)), и относительным вкладом в значение ε'_{22} . Сам факт появления этой низкочастотной компоненты дисперсии и указанные особенности находят объяснение в рамках обсуждавшейся модели.

Однотипный вид кривых (монотонное возрастание на низкочастотном участке шкалы) свидетельствует о проявлении при всех температурах механизма, отличного от обсужденных выше колебаний доменной стенки. Характеристические времена порядка секунд относят этот механизм к разряду процессов, медленно развивающихся в слабых полях. Представление в координатах $\lg \varepsilon'_{22}(\lg \omega)$ и $\lg \varepsilon''_{22}(\lg \omega)$ (рис. 6) кривых для этих разнесенных температур свидетельствует о выполнении при обеих температурах одного и того же фрактально-степенного закона $\varepsilon'_{22} \sim \omega^{-n}$ и $\varepsilon''_{22} \sim \omega^{-m}$ при $n = 0,2 < 0,5$, $m = 0,16 < 0,5$. Равенство и значение этих показателей степени указывают на присутствие в формировании зависимостей $\varepsilon'_{22}(f)$ и $\varepsilon''_{22}(f)$ при данных температурах сегнетофазы тождественной иерархии одинаковых диффузных (по терминологии работы [10, р. 78]) процессов. Значительный интервал температур и существенное (в 1,5 раза) разли-

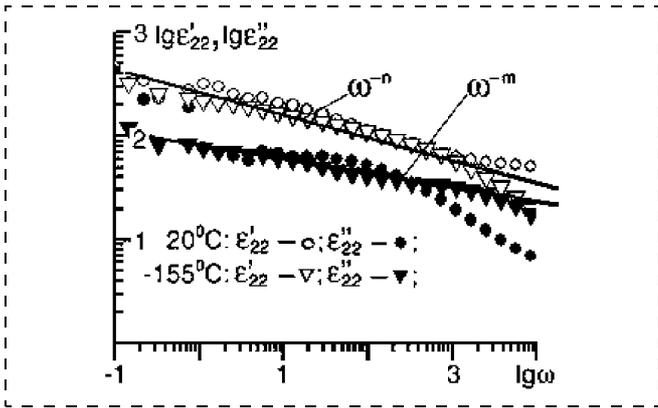


Рис. 6. Взаимная параллельность кривых $\lg \varepsilon'_{22}(\lg \omega)$ и $\lg \varepsilon''_{22}(\lg \omega)$ для $T = 20^\circ\text{C}$ и $T = -155^\circ\text{C}$ свидетельствует о едином механизме зарождения и развития доменов при этих температурах. Значения $P_s(20^\circ\text{C})$ и $P_s(-155^\circ\text{C})$ отличаются в 1,5 раза

чие в значениях P_s позволяют рассматривать это заключение как общее, распространяющееся на низкочастотные области при всех температурах. Естественно, что роль этого механизма зависит при каждой из температур от вклада других присутствующих механизмов.

Для сегнетоэлектриков типичным медленно текущим процессом изменения полярного состояния в малых полях является процесс зарождения доменов и их прорастания в объеме [11, с. 128, 365]. Другими словами, на частотах ниже $f \leq 5$ Гц для $49,04^\circ\text{C}$ (см. рис. 2), ниже $f \leq 10^2$ Гц для 20°C (см. рис. 4) и ниже $f \leq 5 \cdot 10^3$ Гц для -155°C (см. рис. 5) начинается проявление специфического поведения сегнетоэлектрика во внешнем поле, когда в формировании значений $\varepsilon'_{22}(f)$ и $\varepsilon''_{22}(f)$ участвуют совместно и колебание доменной стенки, и процесс образования новых доменов внешним полем. Выше указанных частот вклад в зависимости $\varepsilon'_{22}(f)$ и $\varepsilon''_{22}(f)$ вносят только колебания стенок ранее созданных доменов. С понижением же частоты становится возможным образование новых доменов, т. е. инициируется локальная переполяризация. Зародыш домена формируется на структурном дефекте. В случае высокосоввершенных кристаллов доминирующим источником дефектов являются неизбежные поверхностные нарушения решетки. Предельное полярное состояние этого этапа должно соответствовать состоянию сегнетоэлектрика в поле нулевой частоты (постоянном), т. е. быть монодоменным. Отсюда на промежуточных частотах при $f \rightarrow 0$ в величину $Q_{\text{дом}}$ должна вносить вклад непосредственная, продолжающаяся в течение полупериода, переполяризация микрообъемов, первоначально усредненно индицируемая как монотонное возрастание $\varepsilon'_{22}(f \rightarrow 0)$. Переполяризуемая компонента (заштрихованные облас-

ти на рис. 4, а и 5, а) в значениях $\varepsilon'_{22}(f)$ и $\varepsilon''_{22}(f)$ многократно превышает индуцируемую. Снижение вклада колебаний стенки и доминирование механизма переполяризации находит отражение в вырождении низкочастотных участков зависимостей $\varepsilon'_{22}(\varepsilon''_{22})$ из дуг в прямые линии (см. рис. 1, б; 4, б, 5, в).

При разумных значениях времени измерений для $f \leq 10^{-2}$ Гц усреднение весьма затруднено и индицируемые значения $\varepsilon'_{22}(f \rightarrow 0)$ и $\varepsilon''_{22}(f \rightarrow 0)$ демонстрируют скачки соответствующих величин (см. рис. 4, а; 5, а, б), отражая таким способом на шкалах $\varepsilon'_{22}(f \rightarrow 0)$ и $\varepsilon''_{22}(f \rightarrow 0)$ эффект Баркгаузена в малых полях. Абсолютное значение переключаемой поляризации, пропорциональное площади вновь образующихся доменов и значению P_s , невелико ($\sim 10^{-3} P_s$) [11, с. 133], хотя и является много большим, чем значение индуцируемой поляризации. Явление переключения формирует при измерениях и псевдоэффект "отрицательных потерь" (см. рис. 4, а) — следствие временных сдвигов между фазой внешнего поля и развитием процесса переключения. Представляется возможным синтезировать и условия индикации "отрицательной диэлектрической проницаемости".

Существенным является вопрос о проявлении в этих измерениях собственной проводимости образцов, понимаемой не как эквивалентный параметр потерь, а именно как движение свободных заряженных частиц во внешнем поле. На наш взгляд, этот компонент относительно мал и маскируется, при большей части условий, доменным механизмом. Но поскольку эта составляющая должна зависеть от температуры, ее влияние можно выделить в явном виде в некоторых областях температур и малых частот.

Областью, где состояние повышенной электропроводности заведомо известно, является температура фазового перехода (см. рис. 2, а). При $f \leq 5$ Гц начинается резкое, на порядок, увеличение $\varepsilon''_{22}(f \rightarrow 0)$ с некоторым ростом уже исключительно большого значения $\varepsilon'_{22}(f \rightarrow 0)$ (включение механизма переполяризации), сменяющееся для $f \leq 0,4$ Гц крутым монотонным спадом обеих величин. В интервале $10^{-3} \leq f \leq 4 \cdot 10^2$ Гц значения ε''_{22} снижаются на два порядка, значения ε'_{22} — на порядок.

Объяснение такой сингулярности должно исходить из единой посылки. Резкое снижение емкости исследуемого сегнетоэлектрического конденсатора может произойти только вследствие изменившихся под действием поля свойств объема или создания этим инфранизкочастотным полем слабополяризуемого слоя. Последнее явление — формирование постоянным полем запорного или обедненного носителями слоя, называемое также поляризацией или необратимостью электродов, или двойным

электрическим слоем — хорошо изучено применительно к протонпроводящим твердым электролитам [12].

Отсюда исходная гипотеза: протонная проводимость, активированная фазовым переходом, сначала формирует, в дополнение к колебаниям стенок и созданию новых доменов, вклад ε''_{22} и ε'_{22} , а затем участвует в образовании запорного слоя, увеличивая его эффективность при снижении частоты. Перенос протона может осуществляться как по сетке водородных связей, так и путем непосредственного переноса между анионами. Значение критической частоты $f \approx 4 \cdot 10^2$ Гц возможно связано с изменением условий движения протонов, когда независимое перемещение протонов по перепутанным траекториям сменяется их направленным взаимосвязанным движением. Близкая же закономерность характерна для зависимостей ε''_{22} и ε'_{22} , измеренных в парафазе (см. рис. 1, а—в). Повышенная проводимость при этих температурах достаточна для возрастания значений ε''_{22} и ε'_{22} при $f \leq 10^0$ Гц, но ее уровень еще мал для создания запорного слоя на частотах $f \geq 10^{-3}$ Гц, хотя подобная тенденция и прослеживается (см. рис. 1, а—в).

Если высказанная гипотеза о роли проводимости верна, то дисперсионная методика может служить эффективным средством исследования эволюции запорного слоя в точке Кюри.

Заключение

Изложенные результаты создают целостную картину взаимосвязи причин диэлектрической дисперсии модельного объекта — монокристалла триглицинсульфата (ТГС) — в пара- и сегнетофазах в интервале частот $10^{-3} \dots 10^7$ Гц.

Выводы исследования должны быть характерны и для других собственных сегнетоэлектриков. Вместе с тем, эти результаты указывают на важность постановки последующих экспериментов по исследованию намечившихся новых явлений:

1. Углубленное исследование дисперсии в интервале $T_K \pm 0,5$ °С с целью уточнения выводов теории флуктуаций.

2. Исследование эволюции формирования запорного слоя в широком диапазоне температур.

3. Исследование процессов переполяризации в малых инфранизкочастотных полях.

Итоги статьи иллюстрируют информативность сравнительного анализа дисперсии в пара- и сегнетофазах, важного для понимания механизма образования поляризации в ячейке и сопутствующего формирования доменных границ. Пролить свет на эти проблемы должны исследования в расширенном диапазоне частот $f \gg 2 \cdot 10^7$ Гц.

Авторы признательны профессору Б. А. Струкову за критические замечания и обсуждение статьи.

Список литературы

1. Новик В. К., Гаврилова Н. Д., Есенгалиев А. Б. // Изв. АН. Сер. Физическая. 2003. Т. 67. № 8. С. 1188—1193.
2. Петров В. М., Коган О. И. // Кристаллография. 1970. Т. 15. С. 1018—1021.
3. Поплавко Ю. М., Переверзева Л. П., Мериакри В. В., Ушаткин Е. Ф., Огурцов С. В., Ящишин П. Я. // ФТТ. 1973. Т. 15. № 4. С. 1250—1252.
4. Godefroy L. // Journ. de Physique (France), suppl. 1972. Т. 33. Fasc. 4. P. C2-44.
5. Петров В. М. // Изв. АН СССР. Сер. физическая. 1969. Т. 33. № 7. С. 1113.
6. Gilletta F. // Compt. Rend. Acad. Sci. 1964. V. 259. P. 4653.
7. Fousek J., Šafránková M. // Proc. Int. Meet. on Ferroel. Prague, Czechoslovakia. 1966. June 28—July 1. V. II. P. 99.
8. Леванюк А. П. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1965. Т. 29. № 6. С. 879.
9. Гаврилова Н. Д., Дериглазов В. С., Кошпик В. А., Новик В. К., Пошин В. Г., Селюк Б. В. // Кристаллография. 1975. Т. 20. № 6. С. 1235—1239.
10. Jonscher A. K. Universal relaxation law. London: Chelsea Dielectrics Press, 1996.
11. Лайнс М., Глазе А. М. Сегнетоэлектрики и родственные им материалы: Пер. с англ. М.: Мир, 1981.
12. Baranov A. I., Khiznichenko V. P., Sandler V. A., Shvalov L. A. // Ferroelectrics. 1988. V. 81. P. 183—186.

Поздравляем!

Поздравляем главного редактора журнала "Информационные технологии", члена редколлегии журнала "Нано- и микросистемная техника" доктора технических наук, профессора, Заслуженного деятеля науки и техники РФ, лауреата Государственной премии СССР

НОРЕНКОВА ИТОРЯ ПЕЛТРОВИЧА

с награждением орденом Почета за выдающийся вклад в совершенствование высшего профессионального образования и развитие науки.

Желаем здоровья и дальнейших успехов на благо российской науки и образования.

Редколлегия и редакция

УДК 534.8

В. Г. Гуртовой, А. У. Шелег, д-р физ.-мат. наук,
Институт физики твердого тела
и полупроводников Национальной академии наук
Беларуси, г. Минск

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРИСТАЛЛА $K_3Li_{1,88}Nb_{5,12}O_{15,24}$

Описаны исследования электропроводности и диэлектрических свойств кристалла $K_3Li_{1,88}Nb_{5,12}O_{15,24}$ (KLN) в области температур 90...300 К на частотах 0,1 кГц, 1 кГц, 10 кГц и 1 МГц. Установлено, что с ростом температуры диэлектрическая проницаемость увеличивается, а с увеличением частоты — уменьшается. Показано, что с ростом частоты электропроводность увеличивается на несколько порядков. Обнаружена анизотропия электропроводности и диэлектрических свойств кристалла KLN.

Введение

Кристаллы $K_3Li_{2-x}Nb_{5+x}O_{15+2x}$ (KLN) являются весьма перспективными материалами для использования их в качестве пьезоэлектрических, нелинейно-оптических и электронно-оптических элементов благодаря широкому диапазону прозрачности, высокой лучевой прочности и исключительно хорошим нелинейно-оптическим и электрооптическим характеристикам. В сегнетоэлектрической фазе кристаллы KLN кристаллизуются в тетрагональную структуру с параметрами элементарной ячейки при комнатной температуре $a = 12,5764 \pm 0,0002 \text{ \AA}$ и $c = 4,0149 \pm 0,0001 \text{ \AA}$ [1]. Однако следует отметить, что кристаллы KLN стехиометрического состава нестабильны. Стабильные кристаллы могут быть получены только в случае избытка в расплаве Nb, т. е. при нестехиометрическом составе $K_3Li_{2-x}Nb_{5+x}O_{15+2x}$. Авторы работы [2], используя различный состав расплава, выращивали кристаллы KLN, параметры ячейки которых изменялись в пределах $a = 12,49...12,60 \text{ \AA}$ и $c = 4,01...4,06 \text{ \AA}$. Следует иметь в виду, что от состава расплава зависят не только кристаллографические параметры, но и ряд других физических свойств, например, температура Кюри, длина волны при некритичном фазовом синхронизме и др. Поскольку кристалл KLN известен как нелинейный оптический материал, опубликованные данные о нем в основном относятся к оптическим свойствам. В литературе имеется несколько работ, посвященных исследованию диэлектрических

свойств KLN [3, 4]. В работе [3] проведены исследования влияния химического состава на диэлектрическую проницаемость в области фазового перехода, а в работе [4] — измерения диэлектрической проницаемости для одного направления в области температур 273...820 К на частотах 10, 50 и 100 кГц без указания точного химического состава исследуемых кристаллов.

В данной работе приводятся результаты исследования температурной зависимости электропроводности и диэлектрических свойств кристалла $K_3Li_{1,88}Nb_{5,12}O_{15,24}$ в области температур 90...300 К в различных кристаллографических направлениях на частотах измерительного поля 0,1 кГц, 1 кГц, 10 кГц и 1 МГц. Концентрация ионов лития в полученном кристалле была определена по результатам измерения длины волны, на которой кристалл KLN данного состава имеет фазовый синхронизм 90° при комнатной температуре.

Методика измерений

Измерения электропроводности σ , диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ кристаллов KLN проводили с помощью цифрового измерителя E7-12 на частоте 1 МГц и с помощью измерителя E7-14 на частотах 0,1, 1 и 10 кГц. Температурные зависимости σ , ϵ и $\text{tg}\delta$ определялись в режиме квазистационарного непрерывного нагревания образца со скоростью $\sim 0,5 \text{ К/мин}$. Образец помещали в специальный держатель, который опускали в пары жидкого азота. Образцами служили монокристаллические пластинки KLN толщиной $\sim 1...2 \text{ мм}$, поверхности которых совпадали с кристаллографической плоскостью (001) или (110). Образцы вырезали из монокристаллических буль, выращенных из расплава методом Чохральского. Плоскость (001) рентгенографическим методом выводилась на поверхность среза с точностью $5...8'$, а плоскость (110) была естественной плоскостью роста. Температура образца измерялась хромель-копелевой термопарой, спай которой находился на поверхности образца. Регулировка температуры осуществлялась терморегулятором с помощью нагревателя, вмонтированного в держатель образца. В качестве электродов использовалась серебряная паста.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 приведены температурные зависимости диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ монокристалла KLN, измеренные на разных частотах в интервале температур 90...300 К вдоль кристаллографического направления [110]. Как видно из рис. 1, а, в об-

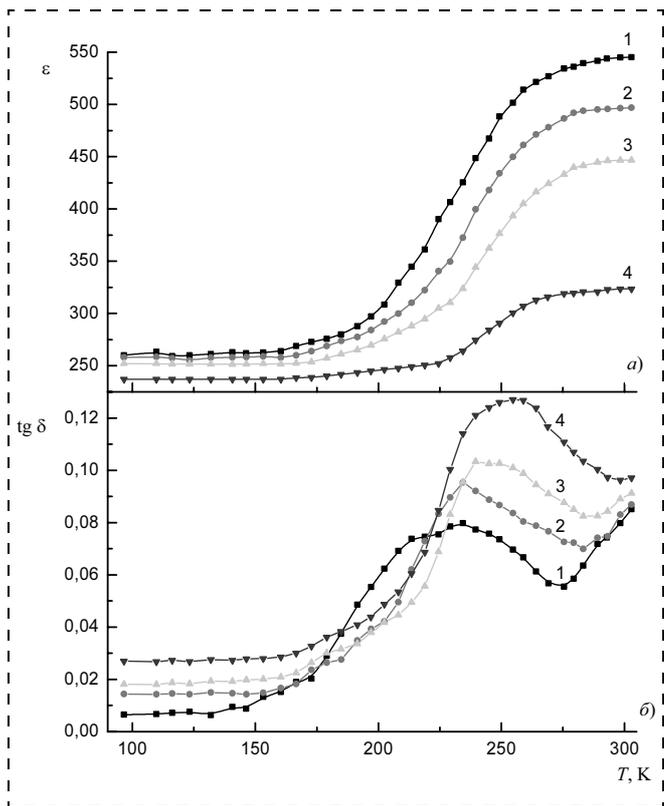


Рис. 1. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости (а) и $\text{tg } \delta$ (б) кристалла KLN вдоль направления [110]. Частота измерительного поля: 1 — 0,1 кГц; 2 — 1 кГц; 3 — 10 кГц; 4 — 1 МГц

ласти низких температур 90...200 К значения диэлектрической проницаемости ϵ с ростом температуры практически не изменяются и равны $\epsilon_1 \approx 270$ для частот $10^2 \dots 10^4$ Гц и $\epsilon_2 \approx 240$ для частоты 10^6 Гц. В интервале температур $\sim 200 \dots 270$ К с ростом температуры происходит резкое увеличение значений диэлектрической проницаемости до значений $\epsilon_1 \approx 540$ и $\epsilon_2 \approx 320$, соответственно для частот 10^2 и 10^6 Гц при $T = 270$ К. Наблюдается значительная дисперсия диэлектрической проницаемости ϵ исследуемого кристалла, причем с ростом температуры дисперсия увеличивается. При повышении измерительной частоты величина ϵ уменьшается.

Температурные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ обнаруживают характерные максимумы, которые располагаются в температурной области резкого повышения значений диэлектрической проницаемости (см. рис. 1, б). При низких температурах от температуры жидкого азота до $T = 150$ К значения $\text{tg } \delta$ близки к нулю для всех частот. При повышении температуры в интервале температур 150...250 К наблюдается резкий рост до $(\text{tg } \delta)_{\text{max}}$, затем происходит уменьшение значений в интервале температур 250...280 К. При

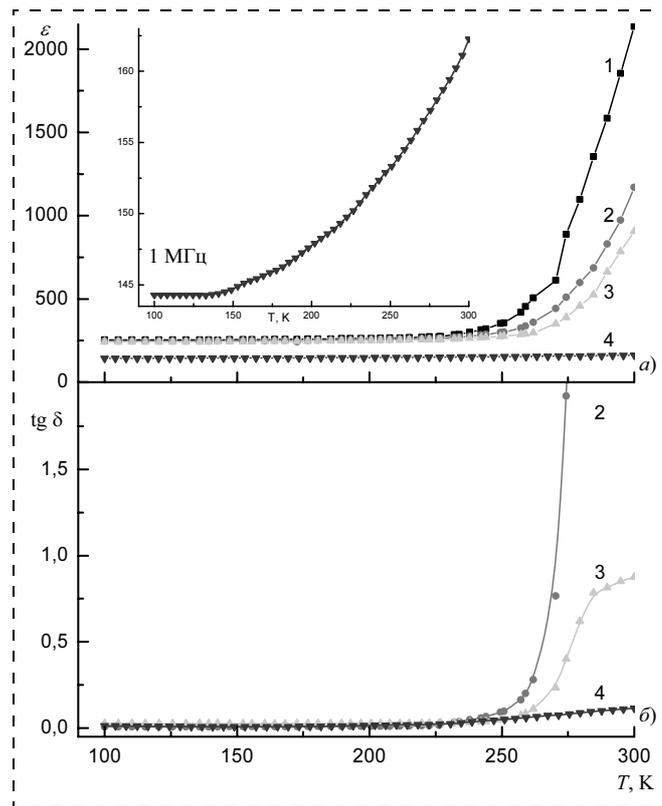


Рис. 2. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости (а) и $\text{tg } \delta$ (б) кристалла KLN вдоль направления [001]. Частота измерительного поля: 1 — 0,1 кГц; 2 — 1 кГц; 3 — 10 кГц; 4 — 1 МГц

температуре выше 280 К вновь отмечается рост значений $\text{tg } \delta$, обусловленный сквозной проводимостью. Из рис. 1, б видно, что наблюдаемые на кривых $\text{tg } \delta = f(T)$ максимумы с ростом частоты сдвигаются в область более высоких температур, что связано с релаксационными процессами, происходящими в высокочастотной области измерений.

Температурные зависимости $\epsilon = f(T)$ и $\text{tg } \delta = f(T)$ для кристалла KLN на разных частотах в интервале температур 100...300 К в направлении [001] представлены на рис. 2. Видно, что характер температурных зависимостей $\epsilon = f(T)$ и $\text{tg } \delta = f(T)$ вдоль кристаллографического направления [001] такой же, как и для направления [110]. Отличие состоит в том, что резкое увеличение значений ϵ и $\text{tg } \delta$ с ростом температуры происходит при более высоких температурах. Так, резкий рост значений диэлектрической проницаемости начинается при температуре $T \approx 250$ К, а ϵ при температуре $T \approx 300$ К достигают значений ~ 2100 для низких частот и ~ 160 для частоты 10^6 Гц. На кривых зависимостей $\text{tg } \delta = f(T)$ (рис. 2, б) в исследуемом интервале температур максимумы не наблюдаются, так как они расположены при $T > 300$ К.

Из рис. 1 и 2 следует, что в кристалле KLN наблюдается значительная анизотропия диэлектрической проницаемости. Значения ϵ вдоль направления [001] в несколько раз больше, чем в направлении [110]. Видимо это обусловлено особенностями кристаллической структуры и характером атомных смещений в элементарной ячейке этого кристалла (возникновение диполей в результате прыжкового обмена носителей заряда между соседними нейтральными дефектами) [1]. Следует отметить, что в области 250...300 К проявляется значительная дисперсия диэлектрической проницаемости. С ростом частоты значения ϵ уменьшаются, что связано с дисперсией релаксационной составляющей диэлектрической проницаемости.

На рис. 3, а, б показаны зависимости логарифма электропроводности от обратной температуры, измеренные на разных частотах вдоль направления [110] и [001] кристалла KLN. Видно, что с ростом температуры электропроводность быстро растет. Следует отметить, что абсолютные значения электропроводности сильно зависят от частоты измерительного электрического поля, что особенно заметно в области низких температур. Это обусловлено наложением проводимости обычного характера и прыжковой проводимости. Значение σ с ростом частоты увеличивается на несколько порядков. Температурные зависимости $\sigma = f(T)$ имеют характерный для полупроводников вид ломаной кривой, разные участки которой соответствуют различным типам проводимости. При низких температурах в области $\Delta T \approx 90...150$ К для направления [110] и $\Delta T \approx 100...230$ К для направления [001] проводимость практически не зависит от тем-

пературы. Она обуславливается подвижностью $\mu(T)$ имеющихся в образце носителей и прыжковой проводимостью с определенной нами по тангенсу угла наклона кривых энергией активации $\Delta E_a \approx 2...6$ мэВ для частот $10^2...10^6$ Гц. В интервале температур 150...230 К и 230...280 К для направлений [110] и [001] соответственно, зависимость приобретает линейный характер, что говорит о примесном характере проводимости. При дальнейшем повышении температуры концентрация носителей не изменяется, поскольку примесные уровни истощены, и проводимость определяется подвижностью $\mu(T)$ основных носителей и прыжковой проводимостью с энергией активации $\Delta E_a \approx 0,1...0,2$ эВ.

Полученные закономерности можно интерпретировать в рамках модели релаксационного механизма, предложенной Рамиресом (*Ramirez A. P.*) для объяснения высоких значений диэлектрической проницаемости в $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ [5], так как она дает наиболее вероятное описание процессов, происходящих в исследуемом кристалле KLN. В качестве изолированных дефектов в этом случае могут выступать *P*-акансии (V_P) и частичное разупорядочение литиевой подрешетки в связи с нестехиометрическим составом [1], что нарушает исходную структуру кристалла. Под действием внешнего переменного электрического поля дефектные области подвергаются искажениям и релаксируют между альтернативными эквивалентными конфигурациями, сохраняя в среднем структуру кристалла.

Авторы работы [1] при исследовании спонтанной поляризации в кристалле KLN пришли к выводу, что этот кристалл не является чисто ионным, так как в величину поляризации P_s значительный

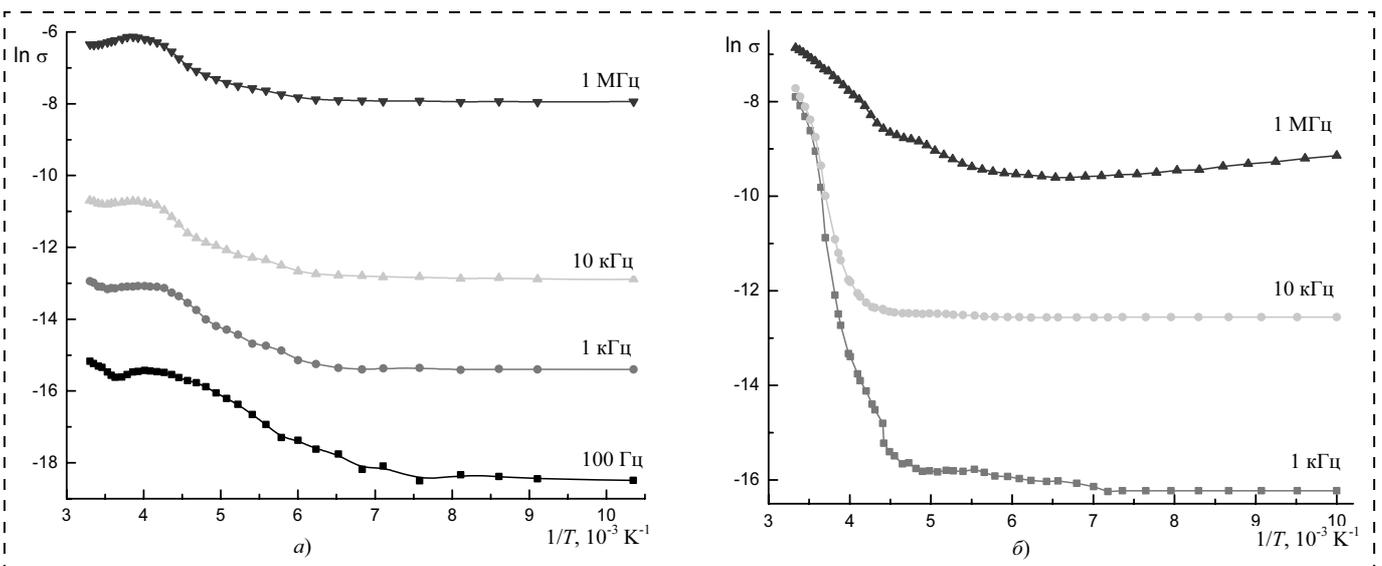


Рис. 3. Температурные зависимости электропроводности кристалла KLN: а — вдоль направления [110]; б — вдоль направления [001]

вклад вносит электронная составляющая. Поэтому и в процесс переноса заряда в этом кристалле помимо ионной составляющей значительный вклад вносит электронная составляющая и имеет место прыжковый механизм его переноса. Этим логично объяснить такой характер частотной зависимости электропроводности в кристалле KLN. Аналогичные результаты были получены для нелинейно-оптического кристалла β - BaV_2O_4 [6], что согласуется с результатами работы [7], где нелинейно-оптические свойства β - BaV_2O_4 объясняются переносом заряда от кислорода к бору в метаборатном анионе $(\text{B}_3\text{O}_6)^{3-}$.

Таким образом, в области низких температур электропроводность является преимущественно релаксационной и описывается моделью Рамиреса, вследствие небольшой концентрации примесных носителей (электронов) и малой подвижности основных носителей (ионов). При увеличении температуры концентрация электронов быстро растет, и проводимость приобретает примесный характер.

При температурах выше 230 К и 280 К для направлений [110] и [001] соответственно, рост концентрации электронов замедляется из-за истощения примесных уровней, и основную роль начинает играть собственная, ионная проводимость вследствие роста подвижности ионов.

Список литературы

1. Abrahams S. C., Jamilson P. B., Bernstein J. L. // J. Chem. Phys. 1971. **54**. P. 2355.
2. Li Lian, Chong T. C., Xu X. W., Kumagai H., Hirano M. // J. Cryst. Growth. 2000. **211**. P. 281.
3. Kim J. S., Lee H. J. // Cryst. Growth. 2001. **223**. P. 376.
4. Kang G. Y., Yoon J. K. // J. Cryst. Growth. 1998. **193**. P. 615.
5. Ramirez A. P., Lawes G., Butko V., Subramanian M. A., Varma C. M. Eprint, condmat/0209498 (2002) (<http://arxiv.org/pdf/cond-mat/0209498>).
6. Шелег А. У., Гуртовой В. Г. // ФТТ. 2004. **46**. № 3. С. 449.
7. Ивлева Л. И., Горгадзе И. Т., Кузьминков Ю. С., Воронов В. В., Ивановская Е. М. // Неорганические материалы. 1989. **25**. № 5. С. 804.

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

УДК [681.586.325+531.781.2.084.2]001.5

В. Н. Бобровник, Н. А. Шелепин, д-р техн. наук, НПК "Технологический центр" МИЭТ
bobrovnik@pisem.net, shelepin@mikron.ru

АНАЛИЗ СОБСТВЕННОЙ ЧАСТОТЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ТЕНЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ КРЕМНИЕВОГО БАЛОЧНОГО ТИПА (ТКБ)

Рассматривается возможность совместного использования двух программ для расчета добротности датчиков с чувствительными элементами балочного типа. В программе COSMOS/DesignSTAR рассчитываются собственные частоты, в Mechanical Desktop Power Pack — эпюры механических напряжений в целях оптимального месторасположения тензодатчиков на поверхности.

Разработка и производство микроэлектронных датчиков параметров движения на основе интеграции технологии микроэлектроники и микромеханики является важным направлением научно-техниче-

ского прогресса. Миниатюрные микроэлектронные датчики широко используются в современных управляющих и контрольно-измерительных системах во многих отраслях промышленности: машиностроительной, аэрокосмической, автомобильной и др. Одним из самых распространенных типов датчиков являются датчики ускорения (акселерометры).

В последние годы наиболее активно развивается направление разработки кремниевых пьезорезистивных и емкостных микроэлектронных акселерометров. К микроэлектронным относят датчики, у которых чувствительный элемент изготовлен методами полупроводниковой, тонко- или толсто- пленочной технологии или их комбинациями на жестком конструктивном основании, представляющим собой полупроводниковую, диэлектрическую или пьезоэлектрическую миниатюрную подложку [1].

В микроэлектронных акселерометрах чувствительные элементы формируются в виде замкнутых резисторных мостов Уинстона (в пьезорезистивных) или обкладок конденсатора (в емкостных).

Разработанные ранее в ГУ НПК "Технологический центр" МИЭТ пьезорезистивные акселерометры серии МТА-1 и АВИ-1 построены на основе

чувствительного элемента ТКБ-5 (тензопреобразователя кремниевого балочного типа), содержащего мостовую измерительную схему и схему температурной компенсации изменения чувствительности [2]. Конструкция ТКБ-5 представляет собой кристалл кремния в виде балки с концентратором механических напряжений. С лицевой стороны в области концентратора сформированы тензорезистивная мостовая схема, а вне его — схема температурной компенсации изменения чувствительности. В конструкциях акселерометров один конец балки жестко фиксируется к основанию корпуса, а другой является свободным. Для повышения уровня выходного сигнала свободный конец балки может быть дополнен инерционной массой.

На сегодняшний день существует множество программ для моделирования механических напряжений в твердых телах [3]. Частотный анализ проводился с использованием программы COSMOS/DesignSTAR [4], которая является приложением к пакету Cosmos Works, хотя может работать и самостоятельно в связке с другими пакетами (такими как Autodesk Inventor, SolidWorks, Solid Edge). COSMOS/DesignSTAR позволяет определять собственные (резонансные) частоты и соответствующие формы колебаний.

В данной работе проводился частотный и прочностной анализ моделей чувствительного элемента датчика ТКБ-5 (рис. 1, см. третью сторону обложки). Для настройки модели были использованы геометрические размеры реальных изделий. Одной из основных характеристик этих изделий является чувствительность, которая зависит от напряжения питания и геометрических параметров. Было рассмотрено два конструктивных варианта, различающихся длиной тонкой части. Длина балки в обоих случаях 6800 мкм, ширина 2000 мкм и толщина 430 мкм. Размеры инерционной массы составляют в основании от свободного края 1750 мкм и соответственно ее значение ~4 мг.

При моделировании к балке были применены два типа нагрузки. При первом типе нагрузки к верхней поверхности "свободной" (не закрепленной) массы прикладывалась распределенная нагрузка. Второй же тип нагрузки представляет собой точечную силу, приложенную к центру "свободной" массы.

В результате расчета для первого случая (длина тонкой части 800 мкм) собственная частота составила 1530 Гц.

В результате расчета для второго конструктивного варианта, отличающегося от первого изменением длины тонкой части с 800 мкм до 300 мкм, собственная частота увеличилась до 2857 Гц.

При втором типе нагрузки для первого геометрического варианта частота практически не изменилась и составила 1550 Гц, а для второго варианта с длиной тонкой части 300 мкм — 2900 Гц.

Следовательно, можно сделать вывод, что собственная частота не зависит от вида нагрузки.

Для того чтобы сделать вывод о точности расчетов, было проведено сравнение с экспериментальными данными. В результате исследований первого конструктивного варианта было установлено значение резонансной частоты, ее среднее значение было равно 1,6 кГц. Следовательно, точность расчета находится в пределах $\pm 10\%$.

Также для полноты эксперимента были проведены расчеты собственной частоты в зависимости от длины и толщины тонкой части балки. Зависимость частоты от длины и толщины тонкой части балки приведены на рис. 2 и 3 (см. третью сторону обложки).

Была выявлена следующая тенденция: с увеличением длины тонкой части собственная частота падает, а при увеличении толщины — растет. В дальнейшем при проектировании устройств с балочными элементами для получения определенного значения собственной частоты достаточно воспользоваться расчетами и при выборе резонансной частоты сразу заложить геометрические параметры.

На рис. 4 (см. третью сторону обложки) изображено продольное сечение балки и два результата моделирования уровня механических напряжений. Прогиб балки (отклонение от горизонтали) от приложенной нагрузки 2,5 г на конце балки составил

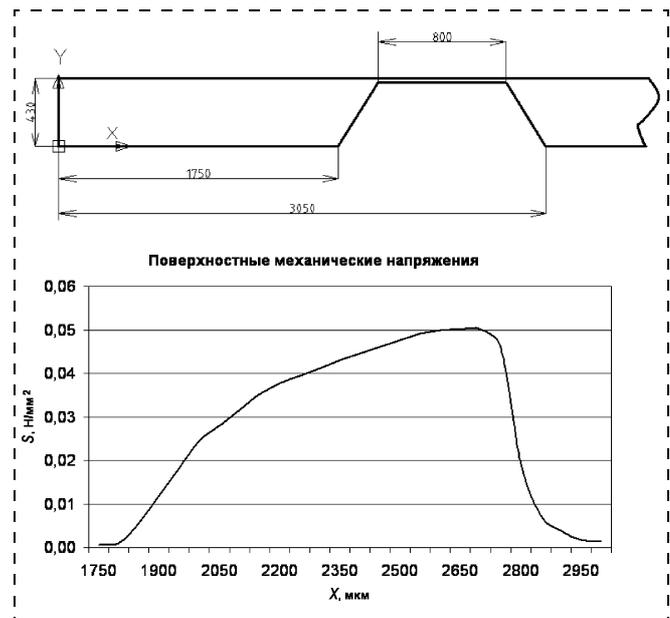


Рис. 5. Эпюра механических напряжений S на тонкой части балки длиной 800 мкм

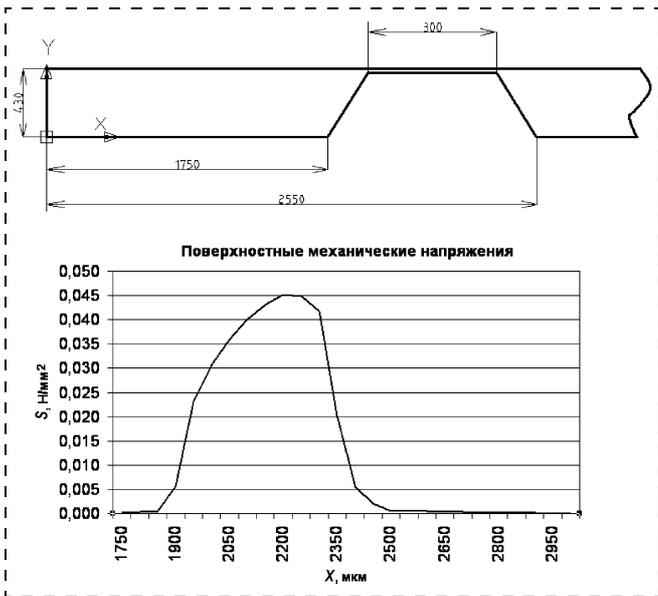


Рис. 6. Эпюра механических напряжений для балки с длиной тонкой части 300 мкм

20 мкм. Для наглядности прогиб масштабирован с небольшим коэффициентом. На верхней части рисунка изображено цветное распределение механических напряжений.

Программный пакет Mechanical Desktop Power Pack позволяет определять значения внутренних и поверхностных напряжений в определенных точках. Благодаря этому можно строить эпюры механических напряжений [5].

Было взято сечение балки ровно по серединам торцов. Затем на интересующем нас участке (тонкая часть, на которой и располагается тензорезистивная мостовая схема) в каждой точке были оп-

ределены механические напряжения и построены соответствующие эпюры для рассматриваемых конструктивных вариантов (рис. 5 и 6).

На данных эпюрах по горизонтальной оси откладывается расстояние от нуля (торца балки) до заданной точки, по вертикальной оси — значения механических напряжений S .

Исходя из полученных результатов можно сделать выводы о наиболее оптимальном расположении тензорезисторов на поверхности балки. На участке тонкой части от 2200 до 2550 мкм наблюдается линейность графика значений уровня механических напряжений. Следовательно, расположение тензорезисторов на этом участке сопровождается их более прогнозируемым поведением.

Расчет частоты и распределения механических напряжений позволяет выбрать оптимальный конструктивный вариант с точки зрения необходимой рабочей частоты колебаний и расположения тензорезисторов. Измерения опытных образцов подтвердили результаты моделирования.

Список литературы

1. Аш Ж. Датчики измерительных систем. Кн. 2. М.: Мир, 1992.
2. Интегральный балочный тензопреобразователь. Патент РФ № 2006993 от 30.01.1994 / Н. Л. Данилова, В. Н. Зимин, Е. В. Сеницын, Н. З. Салахов, В. М. Небусов, Н. А. Шелепин.
3. Погалов А. И., Панкратов О. В. Механические и метрологические характеристики интегральных пьезорезистивных акселерометров // Изв. вузов. Сер. "Электроника". 1997. № 5. С. 85.
4. Алямовский А. А. SolidWorks/CosmosWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов // ДМК. 2004.
5. Басов К. А. Ansys в примерах и задачах. М.: КомпьютерПресс, 2002.

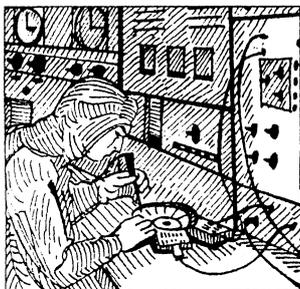
НОВАЯ КНИГА ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"

www.technosphera.ru

Серия
"Мир электроники"

Нанотехнологии в электронике

(под редакцией Ю. Чаплыгина)



2005
Объем около 400 стр.
Формат 70 × 100/16
Переплет
Цена уточняется

В коллективной монографии представлен комплекс исследований, который позволяет уже сейчас применять их результаты для разработок, имеющих важное прикладное значение. Практическое применение принципов нанотехнологии демонстрируется на примерах создания оптических волокон с фотонно-кристаллической структурой, интегральных волноводов на основе субмикронных брэгговских решеток, нелинейно-оптических устройств преобразования частоты оптического излучения, формирования наноразмерных структур на основе высокотемпературных сверхпроводников, реализации датчиков магнитного поля и ИК-излучения, линейных измерений в нанометровом диапазоне. Книга написана ведущими специалистами МИЭТа на основе исследований и разработок последних лет.

Как заказать наши книги!

По почте: 125319 Москва, а/я 594; По факсу: (095) 956 33 46

e-mail: knigi@technosphera.ru; sales@technosphera.ru

Наиболее полная информация, включая оглавления книг, на нашем сайте www.technosphera.ru

УДК 621.382

А. Н. Комов, д-р техн. наук, проф.,
Л. В. Курганская, А. В. Щербак,
Самарский государственный университет

БЕЗЫНЕРЦИОННЫЕ И ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛИ СВЧ МОЩНОСТИ БОЛЬШИХ УРОВНЕЙ НА БАЗЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР SiC/Si

Карбид кремния является одним из перспективных материалов наноэлектроники. Тепловые характеристики карбида кремния позволяют использовать его в приборах, работающих в области высоких температур до 1000 К. Перспективным направлением применения карбида кремния является область сверхвысоких частот больших уровней мощности. Рассмотрены результаты использования гетероструктур карбида кремния на кремнии для измерения высоких уровней СВЧ излучения. Проведена оценка влияния сопутствующих эффектов на выходной сигнал и показана возможность применения таких структур для измерения средних и больших уровней СВЧ излучения методом радиоЭДС.

Введение

Область сверхвысоких частот, охватывающая диапазоны от дециметровых до субмиллиметровых длин волн (10^{11} – 10^{12} Гц), широко используется в науке и технике. Именно на СВЧ работает вся радиолокация, телеуправление, многие виды навигации и связи; этот диапазон является основой для радиоастрономии, радиоспектроскопии, диагностики плазмы и т. д. Развитие современной науки и техники требует непрерывного совершенствования радиоизмерительных средств. Наиболее актуальным является измерение мощности СВЧ излучения.

В этом плане полупроводниковые СВЧ преобразователи занимают большую нишу среди различных видов устройств для измерения уровня мощности. Обладая широким динамическим диапазоном, безынерционностью измерений практически до субмиллиметрового диапазона и высокой чувствительностью, они нашли применение для измерения малых и средних уровней как непрерывной, так и импульсной СВЧ мощности.

Измерение больших уровней проходящей мощности связано со значительными трудностями, обусловленными низкой надежностью используемых преобразователей, искажениями формы пере-

даваемого сигнала. В представленной статье рассматривается разработка полупроводникового измерителя мощности больших уровней СВЧ сигнала на основе радиоэлектрического эффекта в гетероструктурах SiC/Si.

Радиоэлектрический эффект

Одним из перспективных методов для измерения непрерывного и импульсного СВЧ излучения в волноводном тракте является метод, основанный на радиоэлектрическом эффекте в полупроводниках [2].

Исходя из общности рассмотрения кинетики процесса взаимодействия электромагнитной волны со свободными носителями заряда в твердом теле можно считать, что ЭДС, возникающая в проводящей среде, связана с анизотропией функции распределения электронов. Ее возникновение может быть обусловлено силой Лоренца (высокочастотный эффект Холла), т. е. динамическим действием, а также градиентом электромагнитного поля, действие которого, в частности, проявляется в неоднородном разогреве среды вдоль направления вектора Умова—Пойнтинга.

Рассматривая теоретические модели радиоэлектрического эффекта, можно определить условия преобладания увлекающего механизма радиоЭДС над неоднородно разогревающим (градиентным) механизмом возникновения ЭДС. В наиболее простом случае взаимодействия полупроводника с электромагнитным полем температура электронов и фононов локально одинакова. Полная система уравнений для нахождения ЭДС в образце состоит из уравнений Максвелла и уравнения теплопроводности, источником в котором служит джоулева теплота, выделяемая в полупроводнике при прохождении плоской электромагнитной волны. Уравнения Максвелла, описывающие распространение электромагнитного поля, дополняются макроскопической связью между током, электрическим полем и градиентом температуры. Последнее необходимо для учета термоэлектродвижущих сил. Поток теплоты в этом приближении зависит не только от градиента температуры, но и от плотности тока.

Для сравнительно низких частот $\omega = 5,7 \cdot 10^4 \div 2,5 \cdot 10^{11}$ Гц [нормальный скин-эффект — $\alpha L \ll 1$, где α — коэффициент поглощения, L — длина образца по направлению распространения волны, ($\omega\tau \ll 1$, τ — время релаксации электронов)] можно использовать макроскопические уравнения. Уравнение теплопроводности дополняется граничными условиями, которые можно считать ньютоновски-

ми [1], и тогда легко получить для ЭДС увлечения [2] и термоЭДС следующие выражения:

$$V_{\parallel} = \frac{4\pi}{c^2} \mu_H W_0 \frac{1 - e^{-L\alpha}}{\alpha};$$

$$V_T = -\frac{\alpha_T}{\chi} \frac{W_0}{\alpha} \times$$

$$\times \frac{h_1(1 - \alpha L - e^{-L\alpha}) + h_2(1 - e^{-L\alpha}(1 - L\alpha))}{h_1 + h_2 + L},$$

где μ_H — холловская подвижность носителей в полупроводниках; W_0 — плотность потока мощности, падающего на проводящую среду; α — коэффициент поглощения электромагнитной волны; α_T — коэффициент термоЭДС; χ — коэффициент теплопроводности; h_1 и h_2 — коэффициенты обратной величины теплоотдачи, $h_1 = \frac{\chi}{4ST}$; S — постоянная Стефана—Больцмана.

При $h_1 = h_2 = 0$ имеем $V_T = 0$. Это значит, что в случае хорошего теплоотвода с обеих сторон поверхности полупроводниковой пластины термоЭДС не вносит вклад в радиоэлектрический эффект. ТермоЭДС максимальна, если электромагнитная волна поступает на слой полупроводника и вакуума, а температура противоположной стороны поддерживается постоянной. Величины V_T и V_{\parallel} по-разному зависят от толщины пластины.

При $h_1 \gg L \gg \frac{1}{\alpha}$ ЭДС увлечения не зависит от L , а V_T растет линейно с размерами образца. Если это так и $L \gg h_1, h_2, \frac{1}{\alpha}$, то

$$V_T = \frac{\alpha_T}{\chi} W_0 h_1$$

и определяется только теплоотводом через ту сторону пластины, на которую поступает электромагнитная волна. Оценить рост термоЭДС удобно, сравнив V_T и V_{\parallel} [1]:

$$\left| \frac{V_T}{V_{\parallel}} \right| = \frac{\alpha_T c^2}{4\pi \mu_H \chi} f(L\alpha),$$

где

$$f(L\alpha) = \begin{cases} \frac{\alpha L}{2} & \text{при } \alpha L \ll 1; \\ \alpha L & \text{при } \alpha L \gg 1. \end{cases}$$

Еще одним возможным источником объемной термоЭДС может быть неоднородный разогрев свободных носителей заряда. Рассматривая совместно уравнения Максвелла и уравнение переноса заряда и теплоты свободными носителями, получаем [3], что высокочастотный эффект Холла (эффект увлечения) дает основной вклад в радиоЭДС, если выполняется условие

$$\omega \tau_e \frac{k''}{k'} \ll 1,$$

где k' — действительная часть волнового вектора плоской электромагнитной волны; k'' — мнимая часть волнового вектора; τ_e — время релаксации электрона по энергии в полупроводнике. Если неоднородность разогрева электронов вносит основной вклад в постоянный ток (т. е. выполняется условие, обратное (1.5)), то разность потенциалов, возникающая в образце, имеет вид [3]

$$V = -\frac{e}{3m\varepsilon} \frac{1}{v^2 + \omega^2} (E_1^2 - E_2^2),$$

где E_1 и E_2 — напряженности поля на передней и задней стенках полупроводниковой пластины; $v = 1/\tau_e$.

Таким образом, при взаимодействии электромагнитной волны с полупроводником возникают термоЭДС двойкой природы: электронной и решеточной. В случае, когда теплопроводность решетки много больше теплопроводности электронов, т. е.

$$\chi \gg \chi_e \frac{l}{l_e} \frac{L}{\alpha},$$

где χ и χ_e — теплопроводность решетки и электронов соответственно, разогревом решетки можно пренебречь при любой длительности электромагнитного импульса [4]. Таким образом, при достаточно хорошем теплообмене электронной системы можно избежать появления заметной термоЭДС в образце. Следовательно, для того чтобы преобладал увлекающий эффект над разогревающим, необходимо уменьшать толщину образцов и увеличивать теплоотвод с поверхности. Выполнение требований для достижения преобладания увлекающего эффекта над разогревающим наталкивается на принципиальные трудности в рамках рассматриваемых моделей, так как уменьшение толщины образца приводит к возникновению сильной неоднородности полупроводника (влияние неоднородности поверхности) и уменьшению эффективности теплоотвода через боковые грани, что наиболее важно для уменьшения разности температур между передней и задней стенками пластины.

Из теоретических работ по кинетической теории и числовых оценок соотношения постоянных ЭДС, возникающих в типичных полупроводниках при взаимодействии с электромагнитной волной, сделаны следующие выводы.

Соотношения для ЭДС зависят как от внешних условий (распределения и частоты электромагнитного поля), так и от внутренних параметров среды (подвижности, концентрации носителей заряда, диэлектрической проницаемости, теплопроводности, теплопередачи с поверхности).

Для рассмотренной модели в случае плоской электромагнитной волны ЭДС увлечения может преобладать на малых расстояниях вдоль распространения волны, при этом ее абсолютная величина мала для экспериментального обнаружения в известных полупроводниках.

Интерпретация экспериментов с полупроводником в волноводе на основе модели плоской электромагнитной волны не совсем корректна, поскольку такое приближение для СВЧ поля в волноводе правомерно лишь при некоторых параметрах полупроводникового образца и волновода.

Материалы для преобразователей СВЧ мощности

На сверхвысоких частотах требования к параметрам полупроводникового материала, размерам и форме образца, геометрии контакта металл—полупроводник, состоянию поверхности преобразователя становятся более высокими, чем на постоянном токе. Это объясняется тем, что размеры образца сравнимы с длиной волны, особенно в миллиметровом диапазоне длин волн, и вносимое образцом возмущение волны может привести к возникновению нежелательных эффектов. Выбор полупроводникового материала для СВЧ преобразователя определяется двумя факторами: максимальной чувствительностью образцов и наилучшим согласованием их сопротивления с волновым сопротивлением передающего тракта.

Как показано в [5], максимальная чувствительность будет у полупроводников с максимальной подвижностью и минимальной концентрацией носителей заряда. Наиболее приемлемыми материалами в этом случае являются InSb *n*-типа и InAs, обладающие максимальными подвижностями носителей заряда из всех известных полупроводников. Антимонид индия обладает очень высокой подвижностью электронов, достигающей 65 000—78 000 см²/(В·с) при комнатной температуре и 10⁶ при температуре 77 К [6]. Подвижность дырок в 40—100 раз меньше. Эффективная масса электронов 0,0015 *m*₀, дырок — 0,18 *m*₀. Недостатком этого

материала является сильная зависимость его параметров от температуры.

Арсенид индия по своим свойствам похож на антимонид индия. Его зонная структура подобна зонной структуре антимонида индия. Подвижность электронов немного меньше подвижности электронов в InSb. Согласно имеющимся в литературе данным [7], подвижность в InAs *p*-типа лежит в пределах от 460 см²/(В·с) при концентрации акцепторов 3·10¹⁶ см⁻³ до 120 см²/(В·с) при концентрации 2·10¹⁹ см⁻³. Арсенид индия очень трудно выращивается в чистом виде. Он получен с концентрацией 10¹⁶ см⁻³.

Исследования InAs *n*-типа с концентрацией доноров 1,6·10¹⁶ см⁻³ показали [6], что постоянная Холла *R*_х почти не изменяется в пределах от комнатной температуры до 1,5 К, а подвижность равна 30 000 см²/(В·с) в пределах от 10 до 1,3 К.

В отличие от InSb, арсенид индия имеет более слабую зависимость параметров от температуры. Так, температурный коэффициент некоторых датчиков Холла, исследованных в работе [8], обладал высокой линейностью в зависимости от напряженности постоянного магнитного поля, и температурный коэффициент их не превышал 0,04 % в интервале температур 18—150 °С. Воспроизводимость основных характеристик хорошая.

Основной недостаток преобразователей СВЧ мощности на основе InSb и InP при более высоких температурах состоит в том, что они пригодны для измерения малых (милливатты) уровней мощности.

Известно, что материалы с большой шириной запрещенной зоны (SiC, алмаз) имеют параметры, обеспечивающие возможность их применения в приборах, действующих при высоких температурах; эти материалы также обладают высокой теплопроводностью, в них слабо проявляются эффекты радиационных нарушений. Основные параметры карбида кремния в сравнении с кремнием приведены в таблице. Карбид кремния представлен поли типами 6Н-, 4Н-, 3С-, 15R-модификации.

Как видно из таблицы, карбид кремния 3С—SiC имеет подвижность электронов 1000 см²/(В·с), что на два порядка меньше, чем подвижность в InSb. Следовательно, чувствительность преобразователей радиоЭДС на основе SiC будет меньше, чем у аналогичных приборов на основе антимонида индия. Однако большая ширина запрещенной зоны и широкий диапазон рабочих температур карбида кремния делают этот материал пригодным для работы под воздействием больших уровней СВЧ мощности. Кроме того, SiC — это одно из наиболее температуростойких веществ, полупроводниковые приборы из которого могут работать при высоких температурах вплоть до 700 °С. Карбид кремния ус-

| Параметры | Полупроводники | | | | |
|---|----------------|----------------|-----------|-------------|------------|
| | Si | SiC (политипы) | | | |
| | | 3C | 15R | 4H | 6H |
| Ширина запрещенной зоны (300 К) E_g , эВ | 1,12 | 2,4 | 3,02 | 3,28 | 3,09 |
| Постоянные решетки a/c , Å | 5,44 | 4,36 | 3,07/37,3 | 3,076/10,05 | 3,08/15,12 |
| Диэлектрическая проницаемость ϵ/ϵ_0 | 11,18 | 6,5 | | | 6,5 |
| Теплопроводность (300 К), Вт/(см·К) | 0,8—1,4 | 1,3—2,6 | | | 3—5 |
| Допустимая температура T_p , К | 500 | 800 | 1000 | 1000 | 1000 |
| Максимальная скорость дрейфа электронов (300 К) $v_n \cdot 10^7$, см/с | 1 | | | | 2 |
| Дрейфовая подвижность электронов/дырок, $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ | 1350/480 | 1000/60 | 500/60 | 700/60 | 330/60 |
| Поле лавинного пробоя $E_{пр} \cdot 10^4$, В/см | 2—4 | | | | 20—40 |

тойчив против окисления до температуры свыше 1400 °С. Важнейшей особенностью карбида кремния является его устойчивость к радиационным и высокотемпературным полям, что позволяет применять его для создания устройств экстремальной электроники. Однако применение карбида кремния для полупроводниковой электроники сдерживается сложностью получения монокристаллов SiC.

Получение гетероэпитаксиальных пленок 3C—SiC/Si

Для выращивания гетероэпитаксиальных пленок 3C—SiC на кремниевых подложках использовался вертикальный водоохлаждаемый реактор с ВЧ нагревом. Корпус реактора представляет собой кварцевую трубку длиной 400 мм и диаметром 65 мм. Схематически установка гетероэпитаксии изображена на рис. 1.

Реактор 1 содержит пьедестал 2, изготовленный из особо чистого углерода и покрытый карбидом кремния. Пьедестал имеет две температурные зоны: зону исходных реагентов (4) и зону химического разложения гидридов кремния и углерода (3), где происходит их осаждение на подложку. Температурный градиент между двумя зонами обеспечивается тепловыми экранами. Нагрев пьедестала осуществлялся ВЧ полем, создаваемым генератором 5 типа ВЧГ4-25/0,44. Температура контролировалась оптическим пирометром.

Для очистки газа-носителя (водорода) использовалась установка УОВ-1,5 (7) с палладиево-серебряным фильтром. Очистка системы установки УОВ-1,5 от остаточных газов обеспечивалась вакуумным насосом типа 2НВП-5ДМ (6).

Процесс формирования эпитаксиальных слоев кубического карбида кремния состоит из следующих этапов. Вначале осуществляется доставка в зо-

ну осаждения газообразного углеводорода, образованного в зоне исходных реагентов при взаимодействии газа-носителя водорода со свободным углеродом. Следующим этапом являются перенос углеводорода к поверхности кремниевой подложки и адсорбция реагентов, после чего возникают поверхностные процессы, в том числе химическая реакция, поверхностная диффузия углерода в кремнии, встраивание атомов углерода в решетку кремния. Заключительными этапами данного процесса являются десорбция побочных продуктов реакции, перенос побочных продуктов от поверхности кремниевой подложки к основному газовому потоку и удаление продуктов реакции из зоны осаждения.

В данной работе гетероэпитаксиальные слои 3C—SiC на Si-подложках получены с помощью

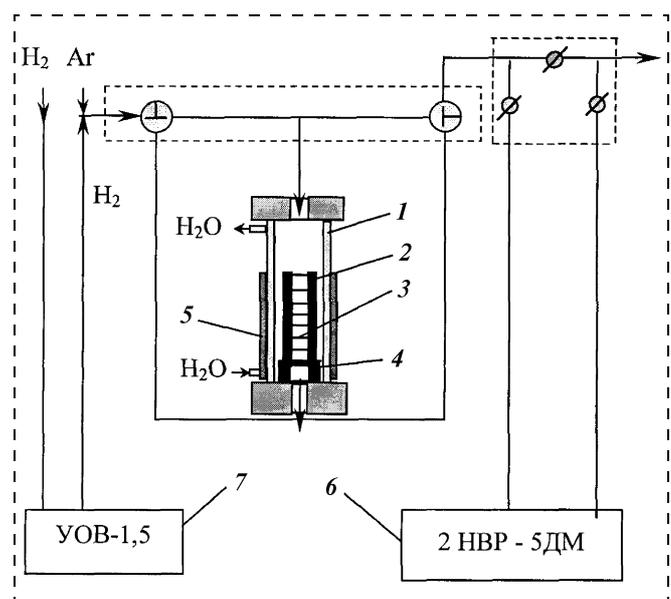


Рис. 1. Установка гетероэпитаксиального выращивания пленок 3C-SiC на кремнии по диффузионной технологии

следующего технологического приема: исходные подложки подверглись термоудару (резкому нагреву до температуры 1360 °С) и на них был выращен гетероэпитаксиальный слой. Легирование гетероэпитаксиального слоя 3С—SiC на Si-подложках проводилось в процессе роста пленок. Тигли предварительно насыщались парами соответствующих легирующих примесей из твердофазных источников. Скорость роста пленок составила примерно 3 мкм/ч.

Разработка преобразователя радиоЭДС

Нахождение оптимальных электрофизических параметров материала для изготовления преобразователя радиоЭДС требует рассмотрения взаимодействия электромагнитной волны с изотропной средой, характеризующейся эффективной массой m^* носителей заряда, их концентрацией n и временем релаксации τ . В качестве исходных выбирают уравнения Максвелла и кинетическое уравнение для функции распределения носителей заряда в полупроводнике. Совместное решение уравнений Максвелла и Больцмана приводит к следующему выражению для радиоЭДС [2]:

$$V_{\parallel} = \frac{4\pi}{c} \mu_n \frac{(1 - e^{-\alpha L})}{\alpha} W_0. \quad (1)$$

Коэффициент поглощения волны α имеет вид

$$\alpha = -\frac{\omega}{c\sqrt{\epsilon'(\omega)}} \epsilon''(\omega), \quad (2)$$

где $\epsilon'(\omega)$ и $\epsilon''(\omega)$ — вещественная и мнимая части диэлектрической проницаемости полупроводника:

$$\epsilon'(\omega) = \epsilon_0 \left\{ 1 - \left\langle \frac{\omega_L^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} \right\rangle \right\}; \quad (3)$$

$$\epsilon''(\omega) = -\epsilon_0 \frac{\omega_L^2}{\omega} \left\langle \frac{\omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \right\rangle;$$

ω — частота волны; $\omega_L = \sqrt{4\pi n q^2 / (\epsilon_0 m)}$ — плазменная частота (n — концентрация носителей заряда, ϵ_0 — статическая диэлектрическая проницаемость среды). Из формул (1)—(3) следует, что чувствительность преобразователя $\gamma = \frac{V_{\parallel}}{W_0}$ зависит от

параметров материала преобразователя. Такими параметрами являются: подвижность носителей

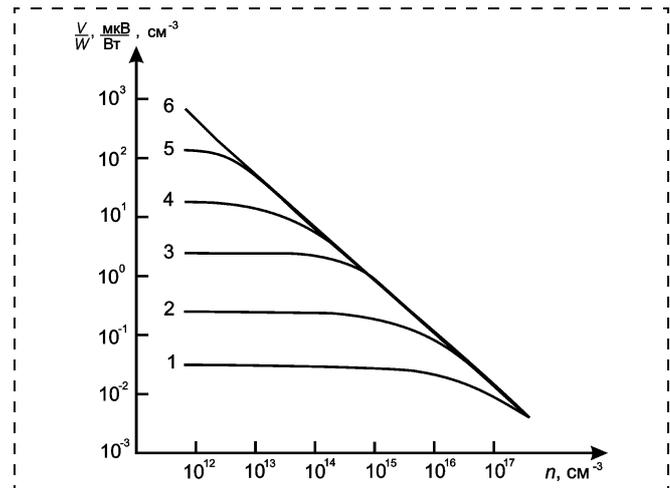


Рис. 2. Зависимость чувствительности преобразователя радиоЭДС от концентрации свободных носителей заряда при $\mu, \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$: 1 — 10; 2 — 10^2 ; 3 — 10^3 ; 4 — 10^4 ; 5 — 10^5 ; 6 — 10^6

заряда μ и их концентрация n . На рис. 2 представлены зависимости чувствительности преобразователя от концентрации свободных носителей заряда, рассчитанные по формулам (1)—(3) при различных значениях подвижности носителей заряда. Как видно из рисунка, максимальной чувствительностью будут обладать образцы с максимальной подвижностью и минимальной концентрацией. Аналогичный результат получен и в феноменологической теории сверхвысокочастотного эффекта Холла [9].

Неотъемлемым элементом преобразователя радиоЭДС является невыпрямляющий контакт типа металл — полупроводник. Изготовить контакт, не обладающий вентильными свойствами к полупроводнику, представляет значительные трудности. При работе преобразователей в СВЧ диапазоне вентильные свойства контактов приводят к нелинейным искажениям, к ослаблению радиоЭДС, к нелинейной зависимости между воздействующим на образец полем и возникающей радиоЭДС.

Одним из способов снижения эффекта выпрямления на контакте металл — полупроводник и контактной термоЭДС является вынос контактов из СВЧ тракта. Для этой цели преобразователь радиоЭДС выполняется такой формы, чтобы места соединения полупроводник — металл располагались вне СВЧ электромагнитного поля. Просачивание СВЧ поля на контакты можно ограничить использованием фильтра нижних частот. Фильтр может быть выполнен в виде набора чередующихся участков линии с высоким и низким волновым сопротивлением, что достигается изменением ширины

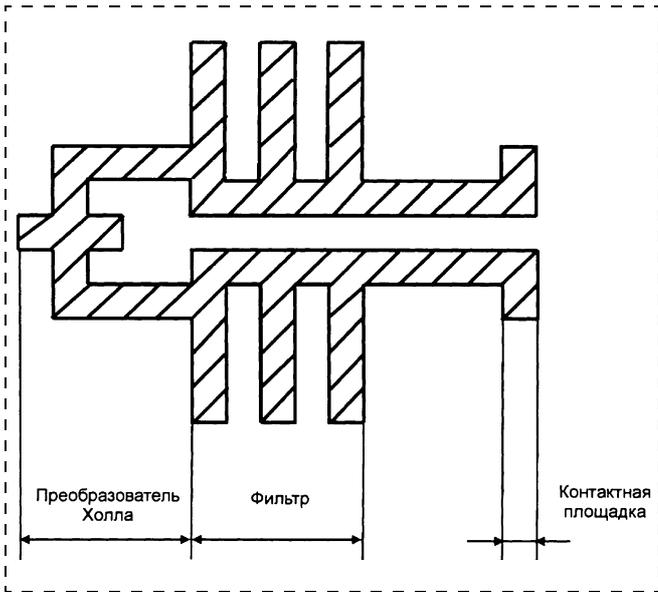


Рис. 3. Преобразователь Холла с фильтром нижних частот

токонесущего проводника. Конструкция такого преобразователя показана на рис. 3.

Однако такое устройство позволяет работать только на фиксированной частоте. Для расширения полосы рабочих частот в данной работе были использованы преобразователи с удлиненными выводами, как показано на рис. 4. Контакты металл—полупроводник расположены вне тракта, передающего СВЧ энергию. Уширенные полоски выводов выполнены в целях снижения термоЭДС.

В данном случае результирующая ЭДС, появляющаяся на контактах преобразователя радиоЭДС, определяется алгебраической суммой различных ЭДС. Наибольший вклад среди сопутствующих паразитных эффектов вносит термоЭДС, обусловленная градиентом температуры между невыпрямляющими контактами преобразователя в поле СВЧ волны и неравномерным разогревом его объема (рис. 5).

В режиме работы генератора СВЧ на согласованную нагрузку грань $a-c$ преобразователя, поглощающая падающую на нее электромагнитную волну, нагревается больше, чем противоположная грань $b-d$. Это приводит к возникновению градиента температуры вдоль направления распространения волны, а следовательно, к появлению термоЭДС, которая определяется выражением

$$V_T = -\alpha_T \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (4)$$

где α_T — коэффициент термоЭДС полупроводника.

Как видно из этого выражения, расчет термоЭДС сводится к определению градиента температуры по длине преобразователя. При существовании в волноводе стоячей волны термоЭДС может

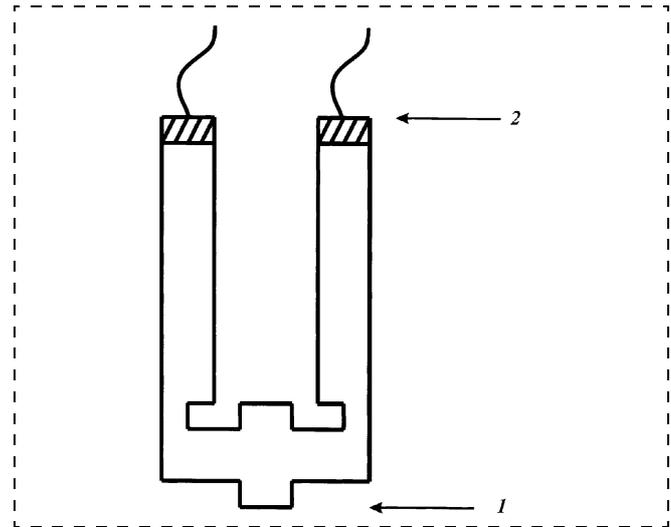


Рис. 4. Преобразователь радиоЭДС с удлиненными выводами: 1 — холловский преобразователь; 2 — контакты металл—полупроводник

существенно возрастать, а в случае соизмеримости длины волны с линейными размерами преобразователя достигает максимального значения. Это объясняется тем, что градиент температуры по ширине преобразователя зависит от электрической компоненты поля, а так как размеры преобразователя соизмеримы с длиной волны, то его положение относительно стоячей волны может оказаться таким, что градиент напряженности электрического поля будет максимальным.

Исследование радиоэлектрического эффекта в гетероструктурах SiC/Si

В данной работе проводилось исследование радиоЭДС в гетероструктурах SiC/Si. Преобразователи на основе кремния n - и p -типа имели следующие параметры:

- p -типа проводимости с сопротивлением при температуре жидкого азота $R = 10 \div 38$ Ом и соотношением $R(293 \text{ К})/R(77 \text{ К}) = 11,5 \div 48$;

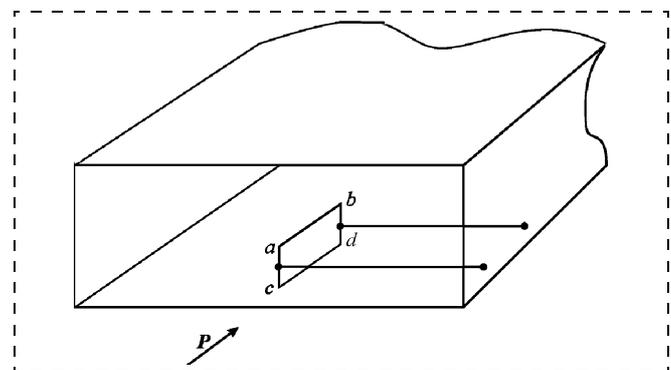


Рис. 5. Расположение преобразователя радиоЭДС в волноводе

- *n*-типа проводимости с $R = 40 \div 140$ Ом и соотношением $R(293\text{ K})/R(77\text{ K}) = 1,8 \div 9,6$.

Пленки карбида кремния *n*-типа проводимости на подложках кремния *p*-типа проводимости выращивались по диффузионной технологии гетероэпитаксии в проточной системе при температуре в зоне карбидизации подложек 1360–1380 °С. Скорость роста пленок составляла 2–2,5 мкм/ч. Контролируемое легирование пленок карбида кремния *n*-типа осуществлялось фосфором, а *p*-типа — бором. Полученные для исследований образцы *n*-SiC/*p*-Si имели размеры 3 × 4 мм, толщина пленок SiC составляла 2,5 мкм.

Преобразователи СВЧ мощности помещались в измерительную головку, которая позволяла изменять положение образцов в волноводе относительно узкой стенки (рис. 6).

Принципиальная схема установки для исследования радиоэлектрического эффекта показана на рис. 7. Генератор СВЧ 1 возбуждает электромагнитную волну на частоте 10 ГГц. Ферритовый вентиль 2 предохраняет генератор 1 от действия обратной волны. Аттенюатор 3 позволяет плавно регулировать уровень СВЧ мощности в тракте. Измерительная линия ИВЛ-140 4 служит для измерения КСВН. Измерительная головка для исследования радиоэлектрического эффекта 6 содержит в себе исследуемый преобразователь. Микровольтметр В7-21 5 измеряет возникающую в образце ЭДС. Ваттметр МЗ-13/1 7, подключенный к тракту через ответвитель 8, предназначен для контроля уровня СВЧ мощности в тракте. Согласованная нагрузка 9 поглощает всю дошедшую до нее СВЧ мощность и предотвращает возникновение отраженной волны.

Зависимость выходного сигнала датчика от уровня мощности СВЧ была линейной до 10 Вт непрерывного излучения (рис. 8). На этом рисунке показана также расчетная зависимость радиоЭДС

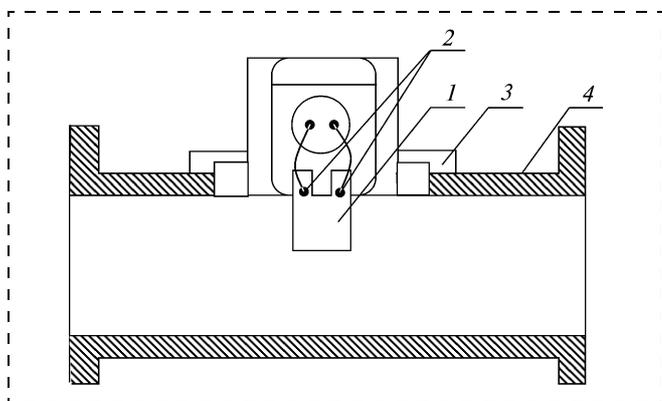


Рис. 6. Расположение образца в волноводе: 1 — образец; 2 — контакты; 3 — измерительная головка; 4 — волновод

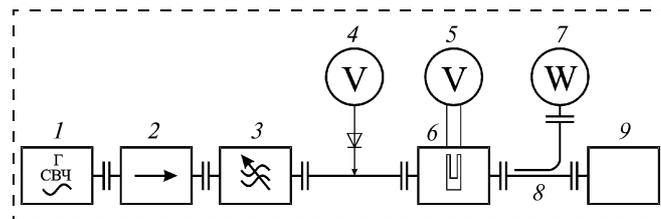


Рис. 7. Принципиальная схема установки для исследования радиоЭДС

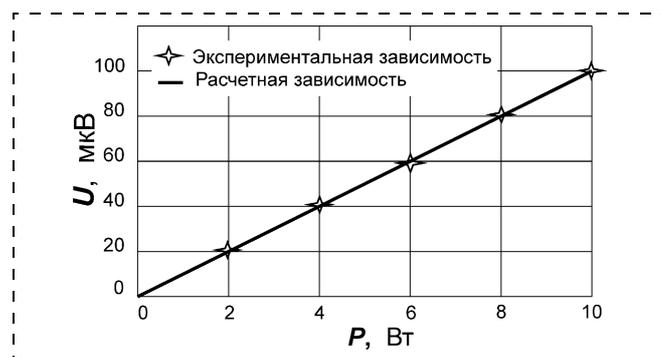


Рис. 8. Вольт-ваттная характеристика датчика СВЧ мощности на основе гетероструктуры *n*-SiC/*p*-Si

от уровня СВЧ мощности, приведенная в [10]. Как видно, расхождений между экспериментальными и расчетными значениями радиоЭДС не наблюдается. КСВН полученных образцов не превышал значений 1,07. В работе [4] показано, что при условии $КСВН \leq 1,1$, влияние термоЭДС на выходной сигнал преобразователя пренебрежимо мало, что подтверждается линейной зависимостью выходного сигнала преобразователя от уровня падающей СВЧ мощности. Выпрямление на контактах металл—полупроводник в исследуемых пределах (до 10 Вт) уровня мощности не обнаружено. Экспериментальное значение чувствительности составляет 10 мкВ/Вт.

Заключение

В статье показано, что гетероструктуры *n*-SiC/*p*-Si могут быть использованы для измерения СВЧ мощности непрерывного излучения до 10 Вт. Однако, учитывая физическую и термическую стабильность карбида кремния, такие структуры наиболее эффективно использовать для измерения больших уровней СВЧ мощности как непрерывного, так и импульсного излучения.

Для оценки предельно допустимой непрерывной СВЧ мощности, измеряемой преобразователем на основе структуры SiC/Si, был выбран размер преобразователя 4 × 2 × 0,03 мм. Максимально допустимая мощность рассеяния в преобразовате-

ле на единицу объема $P_{\text{пр}}$ на постоянном токе определяется из соотношения

$$P_{\text{пр}} = \frac{2\Delta T\alpha}{t},$$

где ΔT — максимально допустимый нагрев преобразователя; для карбида кремния $\Delta T = 800$ °С; $\alpha = 0,5$ Вт · см⁻²/°С — коэффициент теплоотдачи в воздухе; $t = 0,03$ мм — толщина преобразователя. Для указанных величин $P_{\text{max}} = 2,6$ Вт · см³.

Принимая максимально допустимую мощность рассеяния преобразователя равной мощности рассеяния на постоянном токе $2,6$ Вт · см⁻³, вычислим максимально допустимую мощность непрерывных СВЧ колебаний по волноводу. Для трехсантиметрового волновода сечением 23×10 мм и преобразователя с площадью поперечного сечения $4 \times 0,03$ мм мощность, поглощаемая преобразователем, составит $P_{\text{пр}} = 1 \cdot 2 \cdot \frac{1,2}{230} \cdot P \approx 0,02P$, где P — мощность падающего СВЧ излучения. Таким образом, максимально допустимая мощность непрерывных колебаний в волноводу $P = \frac{2,6}{0,02} = 130$ Вт, что примерно в 10 раз больше значений мощности для кремниевых преобразователей.

Список литературы

1. Каганов М. К., Шапиро А. А. О влиянии термоэлектрических сил на радиоэлектрический эффект в проводниках // ФТТ. 1970. Т. 2. Вып. 10. С. 3019—3021.
2. Гуляев Ю. В. О возникновении постоянной ЭДС при распространении электромагнитной волны в проводящей среде // Радиотехника и электроника. 1968. Т. 13. № 4. С. 688—694.
3. Перель В. И., Пинский Я. М. Постоянный ток в проводящей среде, обусловленный высокочастотным электромагнитным полем // ФТТ. 1973. Т. 15. Вып. 4. С. 996—1003.
4. Гуревич Л. Э., Мезрин О. А. Свето- и термоэлектрические эффекты, создаваемые электромагнитной волной в проводящей среде // ФТТ. 1974. Т. 16. № 3. С. 773—784.
5. Комов А. Н., Трещев В. М., Яровой Г. П. Гальваномангнитные СВЧ преобразователи. М.: Радио и связь, 2000. С. 264.
6. Хилсум К., Роуз—Инс А. Полупроводники типа А^{III}В^V. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. С. 323.
7. Карамышева А. Ф. Датчик ЭДС Холла на основе мышьяковистого индия // Вестник электропромышленности. 1962. № 1. С. 59—62.
8. Kancellakos D. P., Schuck R. P., Todd A. C. Hall effect wattmeters // Trans. Inst. Radio Engrs. 1961. AU-9,5. N 1. P. 5—9.
9. Barlow H. E. M., Kataoka S. A Hall effect and its application to power measurement at 10 Gc/s/Proc/IEEE/1958. Vol. 8. P. 53—60.
10. Комов А. К., Чепурнов В. И. Радиоэлектрический эффект в структурах n -3С-SiC/ n -Si в трехсантиметровом диапазоне длин волн // Изв. вузов. Сер. "Электроника". 2001. № 1. С. 76—79.
11. Комов А. Н., Трещев В. М. Вклад термоЭДС рассогласования в радиоэлектрический эффект в полупроводниковой пластине на СВЧ // Электронная техника. Сер. 1. "Электроника СВЧ". 1982. Вып. 11(347). С. 64.

УДК 681.586.325:001.5

Р. А. Фёдоров, Н. А. Шелепин, д-р техн. наук, ГУ НПК "Технологический центр" МИЭТ

РАЗРАБОТКА СХЕМЫ, ПОДДЕРЖИВАЮЩЕЙ РЕЗОНАНСНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА МИКРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Рассмотрена возможность совместного моделирования дифференциальной емкостной микромеханической системы (ЕМС) и электрической схемы. Получена передаточная функция, позволяющая оценить степень влияния основных узлов системы, состоящей из ЕМС и электрической схемы, поддерживающей резонансные колебания.

Введение

Одним из наиболее эффективных методов преобразования физических величин является применение виброрезонансных микросистем, обеспечивающих получение частотного выходного сигнала. Принцип измерения давления с помощью резонансного контура длительное время считается одним из лучших для обеспечения высокой стабильности показаний и точности измерения.

В подобных системах изменение измеряемой физической величины вызывает соответствующее изменение коэффициента жесткости упругого подвеса подвижного элемента, тем самым изменяя собственную и, соответственно, резонансную частоту колебаний микромеханической системы. Таким образом, назначение электронной схемы заключается в возбуждении и поддержке резонансных колебаний в дифференциальной емкостной микромеханической системе путем воздействия на подвижный элемент электростатическими силами.

В таких задачах модели электронных элементов МЭМС, учитывающие воздействие физических величин, необходимо включать в состав системы для динамического анализа, функционирования и расчета характеристик всей электронной схемы и дальнейшей разработки соответствующих функциональных блоков для сложных функциональных (СФ) МЭМС. Анализ работ данной системы может быть проведен с использованием соответствующей системы моделирования, которая позволила бы обеспечить совместное моделирование электронной схемы с механическим движением подвижно-

го элемента емкостной микромеханической системы (EMC).

Основные принципы построения модели EMC

В модели EMC схема дифференциального микромеханического конденсатора замещается трехполюсником с двумя источниками тока [1]. При этом функциональная зависимость источников определяется выражениями

$$I_1 = -\frac{dQ_1}{dt} = -\left(V_{21} \frac{dC_1}{dt} + C_1 \frac{dV_{21}}{dt}\right); \quad (1)$$

$$I_2 = -\frac{dQ_2}{dt} = -\left(V_{32} \frac{dC_2}{dt} + C_2 \frac{dV_{32}}{dt}\right). \quad (2)$$

Схема замещения показана на рис. 1.

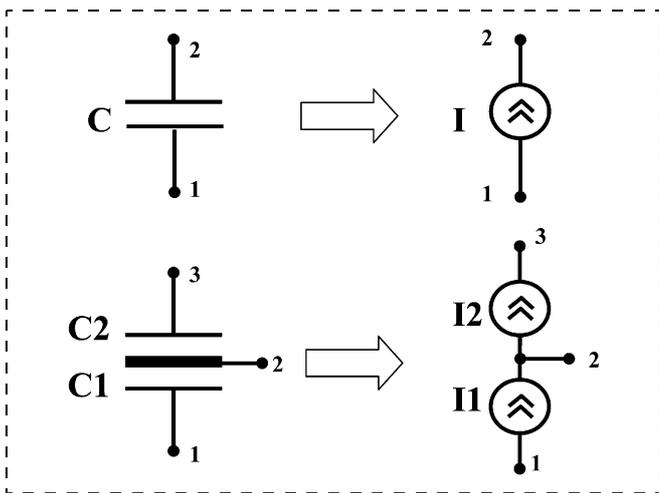


Рис. 1. Схемы замещения одиночного и дифференциального конденсаторов EMC зависимыми

Уравнение перемещения подвижного элемента микромеханической системы будет определяться следующими силами:

- силой инерции вследствие воздействия внешнего ускорения;
- силой торможения, пропорциональной скорости движения, вызванной демпфированием, трением и другими видами потерь энергии;
- силой упругости подвеса;
- силой электростатического притяжения вследствие разности потенциалов между обкладками конденсатора.

Движение чувствительного элемента согласно второму закону Ньютона будет описываться следующим уравнением:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = ma - \eta \frac{dx}{dt} - kx + \frac{\varepsilon S V_{12}^2}{2(x_0 + x)^2} - \frac{\varepsilon S V_{32}^2}{2(x_0 - x)^2}, \quad (3)$$

где η — коэффициент демпфирования; x — перемещение подвижного элемента относительно положения равновесия (x_0); m — масса подвижного элемента; k — коэффициент жесткости; ε — диэлектрическая проницаемость среды.

Добротность колебательной системы — характеристика резонансных свойств системы [2], показывающая, во сколько раз амплитуда вынужденных колебаний при резонансе превышает амплитуду при его отсутствии. Чем выше добротность колебательной системы, тем меньше потери энергии в ней за период. В подобных колебательных системах добротность может достигать значения от 70 до 70 000.

Построение системы, поддерживающей резонансные колебания

Резонансная частота представляет собой частоту, при которой значение амплитуды колебаний максимальна с учетом воздействия демпфирования, электростатических сил и других факторов. Соответственно резонансная частота не будет превышать значение собственной частоты микромеханической системы.

Схему, поддерживающую резонансные колебания подвижного элемента дифференциальной емкостной микромеханической системы, можно построить на основе устройства с обратной связью. Выходной сигнал с емкостной микромеханической системы (EMC) соответственно будет проходить последовательно три стадии:

- считывание;
- усиление;
- преобразование.

Полученный выходной сигнал должен поступать на вход дифференциальной микромеханической системы для формирования отклонения подвижного элемента. Колебания подвижного элемента возникают за счет электростатических сил.

Для нахождения передаточной характеристики системы сначала примем следующие обозначения:

$K(t)$ — коэффициент усиления в усилителе выходного сигнала с микромеханической системы;

$\beta(t)$ — коэффициент обратной связи для усилителя;

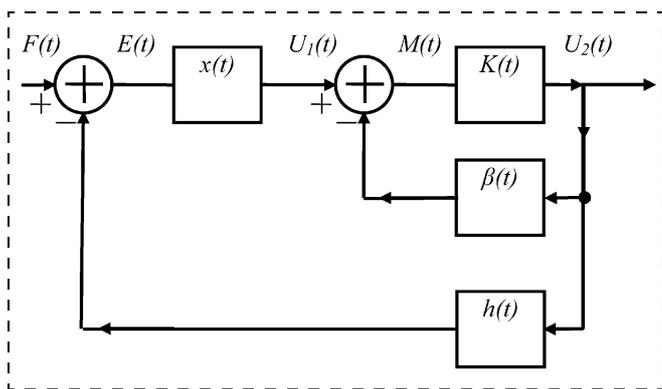


Рис. 2. Структурная схема системы на основе устройства с обратной связью, поддерживающего резонансные колебания подвижного элемента

$h(t)$ — коэффициент обратной связи для микромеханической системы;

$F(t)$ — физическая величина.

На рис. 2 представлена структурная схема системы на основе устройства с обратной связью, поддерживающего резонансные колебания подвижного элемента.

Имеем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} F(t) = E(t) + U_2(t)h(t); \\ E(t) = \frac{U_1(t)}{x(t)}; \\ U_1(t) = M(t) + U_2(t)\beta(t); \\ M(t) = \frac{U_2(t)}{K(t)}, \end{cases} \quad (4)$$

где $U_2(t)h(t)$ — произведение, описывающее сигнал в цепи обратной связи всей схемы;

$U_2(t)\beta(t)$ — произведение, описывающее сигнал в цепи обратной связи усилителей;

$$x(t) = -\frac{m}{k} \frac{d^2x}{dt^2} - \frac{\eta}{k} \frac{dx}{dt} - \text{уравнение, описывающее}$$

поведение подвижного элемента микромеханической системы.

Найдем передаточную функцию системы:

$$H(t) = \frac{U_2(t)}{F(t)} = x(t) \left(K(t) + \frac{1}{\beta(t)} \right) - \frac{1}{h(t)}. \quad (5)$$

Из уравнения (5) видно, что с увеличением значений $x(t)$ и $h(t)$ возрастает значение передаточной функции $H(t)$, иными словами, отношение выходного сигнала к воздействующей физической величине будет тем больше, чем сильнее будет отклонение подвижного элемента от положения равновесия и чем больше амплитуда сигнала, приходящего на неподвижную обкладку динамического конденсатора.

Совместное моделирование EMC и электрической схемы

На основе разработанной *Spice*-модели интегральной EMC и выведенной передаточной функции была разработана электрическая схема, поддерживающая резонансные колебания чувствительного элемента.

Моделирование показало наличие устойчивых резонансных колебаний при изменении коэффициента жесткости подвески подвижного элемента на $\pm 30\%$ от номинального значения.

На рис. 3 представлена схема, поддерживающая резонансные колебания подвижного элемента микромеханической системы для моделирования в программе *PSpice*.

Схема работоспособна в определенном диапазоне изменения физической величины и обладает конечной чувствительностью к входному сигналу. В случае необходимости подстройку схемы можно провести с помощью внешнего резистора, регулирующего амплитуду входного сигнала датчика.

Для точности измерения основные узлы схемы питаются от внутреннего опорного источника питания, который обеспечивает на выходе напряжение $4 \pm 0,1$ В и ток не менее 3 мА. Схема усиления собрана из трех каскадов с последовательным увеличением коэффициента усиления. Выходной каскад служит для формирования управляющего сигнала микромеханической системы. Амплитуда выходного сигнала регулируется варьированием сопротивлений внешних резисторов.

На рис. 4 представлена зависимость резонансной частоты колебаний подвижного элемента от расстояния между подвижной и неподвижной обкладкой EMC.

На рис. 5 представлена зависимость резонансной частоты колебаний подвижного элемента от температуры и при различных значениях коэффициента жесткости k_0 упругого подвеса.

Для данного численного метода в модель была заложена зависимость коэффициента жесткости упругого подвеса k от температуры, которая заведомо превышает практические значения:

$$k(T) = k_0 + \lambda(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2, \quad (6)$$

где $k(T)$ — коэффициент жесткости упругого подвеса, зависящий от температуры; k_0 — коэффициент жесткости упругого подвеса, независящий от температуры; λ и β — линейный и квадратичный температурные коэффициенты соответственно.

В качестве исследования влияния технологического разброса в модель было внесено изменение расстояния между обкладками EMC в диапазоне

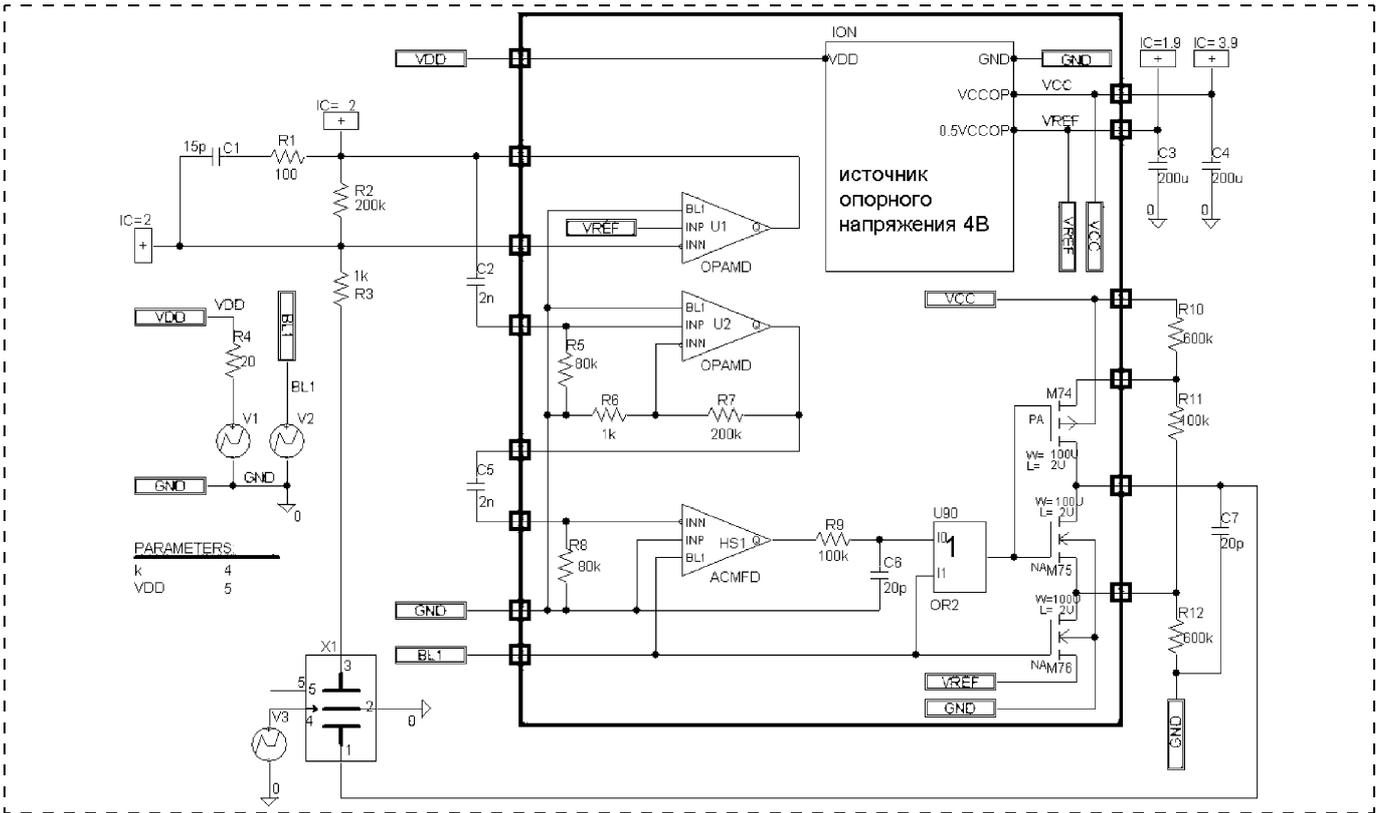


Рис. 3. Электрическая схема, поддерживающая резонансные колебания чувствительного элемента

$\pm 50\%$ от номинального значения. При этом схема показала устойчивую работоспособность.

Получена передаточная функция, которая позволила оценить степень влияния каждой составляющей. На основе изученного материала по методам считывания и обработки сигналов с датчиков физических величин была разработана схема,

поддерживающая резонансные колебания подвижного элемента дифференциальной емкостной микромеханической системы. Схема содержит следующие основные функциональные блоки: источник внутреннего опорного напряжения; каскад усиления сигнала; выходной каскад.

Проведено моделирование схемы в программе

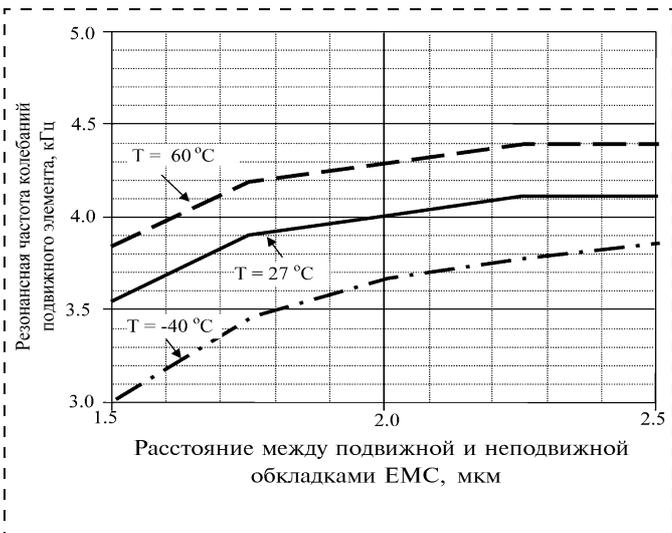


Рис. 4. Зависимость резонансной частоты колебаний подвижного элемента от расстояния между подвижной и неподвижной обкладками EMC

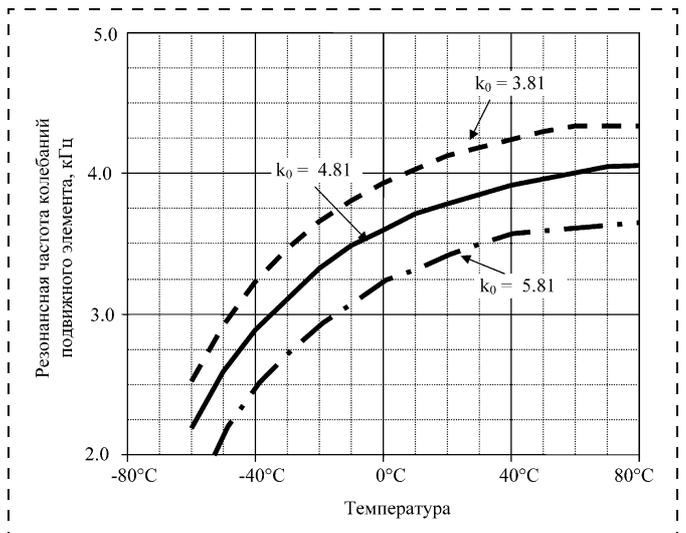


Рис. 5. Зависимость резонансной частоты колебаний подвижного элемента от температуры при различных значениях коэффициента жесткости k_0 упругого подвеса

PSPice с использованием моделей функциональных блоков в базисе КМОП-технологии ГУ НПК "Технологический центр" МИЭТ.

Выводы

Рассмотрена возможность совместного моделирования дифференциальной ЕМС и электрической схемы, поддерживающей резонансные колебания всей системы с учетом воздействия физических величин. Получена передаточная функция, позволяющая оценить степень влияния основных узлов системы.

По результатам моделирования получены:

- зависимости резонансной частоты колебаний от изменения коэффициента жесткости упругого подвеса подвижного элемента;

- зависимости амплитуды колебаний подвижного элемента микромеханической системы от амплитуды входного сигнала;
- зависимости резонансной частоты колебаний от изменения температуры;
- зависимости амплитуды колебаний подвижного элемента микромеханической системы от изменения температуры.

Список литературы

1. Шелепин Н. А. Основные принципы создания SPICE-моделей микроэлектромеханических систем // Микросистемная техника. 2004. № 9. С. 30—35.
2. Аш Ж. Датчики измерительных систем. Т. 1. М.: Мир, 1992.

СПРАВОЧНЫЕ СТРАНИЦЫ

В. В. Лучинин, д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет,
П. П. Мальцев, д-р техн. наук, проф., МИРЭА

О ТЕРМИНЕ "МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА" В РУССКОМ И АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКАХ

Рассматриваются термины "микросистемная технология" (МСТ) и "микроэлектромеханические системы" (МЭМС) в русском и английском языках с учетом того, что русский термин "микросистемная техника" может иметь несколько переводов.

Микросистемная техника (МСТ) пока не имеет канонизированной терминологии, стандартизация микросистем (МС) только начинает формироваться. В Европе чаще всего используется термин "microsystems technology" (MST) — "микросистемная технология".

Существует несколько определений микросистемы. В европейской периодике достаточно долго было принято определять МС так: "Микросистема — это интеллектуальная миниатюризованная система, обладающая сенсорными, процессорными и (или) актюаторными функциями. В ней обычно используется комбинация двух или больше устройств, действующих на основе использования

электрических, механических, оптических, химических, биологических, магнитных или других свойств и интегрированных на одном чипе или мультичиповой плате".

В США чаще используется термин "микроэлектромеханические системы" (microelectromechanical systems): "Микроэлектромеханические системы (МЭМС) — это интегрированные микроустройства или системы, комбинирующие электрические и механические компоненты, изготовленные по технологиям, совместимым с технологией ИС и имеющие размеры от микрометров до миллиметров. Соединение в таких системах компьютерной обработки с чувствительными и актюаторными компонентами позволяет нам ощущать и контролировать окружающий мир".

В Японии чаще пользуются терминами "мехатроника" и, чаще всего, "микромашин" (micromachines): "Микромашин состоят из функциональных элементов размером в несколько миллиметров и способных образовать комплексное микроскопическое устройство".

Каждое из этих определений подчеркивает один из существенных признаков: размер, сложность, интерфейс с окружающей средой и т. д. Разные наименования одних и тех же объектов вынудили западных экспертов объединить аббревиатуры МЭМС, МСТ, ММ в одну — М. Это удачное предложение, отражающее к тому же потенциальную трехмерность микросистемных конструкций, вряд ли приживется без принудительных мер стандартизации. Более того, процесс образования новых терминов продолжается: микроэлектрохимические

системы (МЭХМС), наноэлектромеханические системы (НЭМС), микронанотехнологии (МНТ) и т. д.

Компания NEXUS ввела два понятия (термина): "микротехнология" и "микроструктурирование". Оба обозначают воздействие на материал в целях получения микрокомпонентов размером несколько микрометров. На этой основе дается следующее определение МС: "Микросистема — это комбинация нескольких микрокомпонентов, оптимизированная как целостная система для выполнения одной или нескольких функций и содержащая в большинстве случаев микроэлектронное устройство". Это определение коррелирует с определением МСТ, которое в целом, на наш взгляд, имеет слишком широкие рамки. При попытках сопоставить разноязычную терминологию часто возникают трудности.

Если термины МС и МЭМС практически однозначны в русском и английском вариантах, то русский термин "микросистемная техника" может иметь несколько переводов.

Обратимся к широко распространенной литературе для возможности определения понятия "микросистемная техника" для перевода на английский язык. Прежде всего, используем [1, 2].

Например, в [1] на стр. 248 изложено так:

engineering — техника, технология:

- circuitry engineering** — схемотехника,
- computer engineering** — вычислительная техника,
- electrical engineering** — электротехника,
- electronic engineering** — электронная техника,
- IC engineering** — технология интегральных схем (ИС),
- optical engineering** — техническая оптика,
- radio engineering** — радиотехника,
- systems engineering** — системотехника.

Такой же перевод этих терминов приведен в [2], Т. 1, на стр. 412.

Если использовать термин "микросистемная техника" в понимании, принимаемом при использовании терминов **electrical engineering** — электротехника, **electronic engineering** — электронная техника, **radio engineering** — радиотехника, т. е. процесс создания и конечный продукт, то можно использовать термин **microsystems engineering** — микросистемная техника.

Но для случая обозначения только процесса, аналогичного термину **systems engineering** — системотехника, получим другой перевод: **microsystems engineering** — микросистемотехника.

Рассмотрим термин, приведенный в [1] на стр. 604:

- technology** — 1. техника, 2. технология:
- communication technology** — техника связи,
- computer technology** — вычислительная техника,
- information technology** — информационная техника,
- measurement technology** — измерительная техника,

- solid-state technology** — твердотельная технология,
- space technology** — космическая техника.

Несмотря на наличие английского слова "**technology**" все термины переводятся, прежде всего, как техника [1, 2], но могут переводиться и как технология [2] (по соответствующим отраслям). Кроме того, термин "вычислительная техника" может переводиться двумя английскими терминами [1] — **computer technology** (стр. 604) и **computer engineering** (стр. 248).

Возможно, что такой подход может быть применен и к термину "микросистемная техника", т. е. имеются два термина на английском языке.

Рассмотрим еще один термин, приведенный в [1] на стр. 602:

technique — 1. метод, способ; (технологический) прием; 2. технология:

- integrated technique** — интегральная технология,
- microelectronic technique** — микроэлектронная технология,
- simulation technique** — метод моделирования,
- solid-state technique** — твердотельная технология,
- testing technique** — методика испытаний,
- thick-film technique** — толсто пленочная технология,
- thin-film technique** — тонко пленочная технология.

Следует обратить внимание на то, что термин "твердотельная технология" может переводиться двумя английскими терминами [1] — **solid-state technology** (стр. 604) и **solid-state technique** (стр. 602). Кроме того, термин **technique** довольно часто используется для определения технологии, в том числе: **microelectronic technique** — микроэлектронная технология и **integrated technique** — интегральная технология.

В [2], Т. 2, на стр. 500 приведено еще большее число переводов этого термина:

technique — 1. техника; методика; метод; способ; 2. технология; (технологический) прием; 3. алгоритм; 4. оборудование, технические средства; техника.

Учитывая, что термин **technique**, с одной стороны, означает технику (конкретное оборудование), а также технологии (причем близкие по исполнению к микросистемной) — микроэлектронную и интегральную, но, с другой стороны, очень созвучен по произношению и написанию со словом "техника", то целесообразно переводить название журнала "Микросистемная техника" как "**Microsystems techniques**" Magazine.

С 2004 г. в России используется новый термин "наносистемная техника", отражающий развитие нанотехнологии для создания микросистемной техники, который по аналогии целесообразно переводить как "**Nanosystems techniques**" (NST). Кроме того, возможно применение и термина "наноэлектромеханические системы" — "**nanoelectrome-**

chanical systems" (NEMS).

Следовательно, новое название журнала "Нано- и микросистемная техника" целесообразно переводить как "Nano- and Microsystems techniques" Magazine.

В России термин "микросистемная техника" стал использоваться в официальных документах после принятия в 1996 г. "Перечня критических технологий Федерального уровня". В "Перечне критических технологий Российской Федерации", утвержденном Президентом Российской Федерации 30 марта 2002 г., микросистемная техника включена как самостоятельная критическая технология, содержание которой определено следующим образом: "Сверхминиатюрные механизмы, приборы, машины с ранее недостижимыми массогабаритными, энергетическими показателями и функциональными параметрами, создаваемые интегрально-групповыми экономически эффективными процессами микро- и нанотехнологии".

Следует отметить, для перевода на английский язык термина "микросистемная техника" из выше-названного Перечня вполне подходит термин "Microsystems techniques" (MST). Важно отметить, что в этом случае аббревиатура совпадает с термином "Microsystems technologys" (MST) и создает общность понимания в обсуждаемом вопросе.

Министерство образования и науки Российской Федерации начало подготовку инженеров по новой специальности — 201900 "Микросистемная техника" в рамках Направления 654100 "Электроника и микроэлектроника" (Приказ от 02 марта 2000 г. № 686). Было бы целесообразно использовать для этой специальности следующий перевод названия: 201900 "Microsystems engineering" (по аналогии со специальностями: **electrical engineering** — электротехника, **electronic engineering** — электронная техника, **radio engineering** — радиотехника). В данном случае перевод означает конечный продукт и процесс создания, заложенный в термине "engineering".

В настоящее время вопрос формирования единой позиции в области терминологии, стандартизации, нормативно-технического обеспечения микросистемной техники в России находится в стадии проработки.

Список литературы

1. Лисовский Ф. В., Калугин И. К. Англо-русский словарь по радиоэлектронике. Около 63 000 терминов. 3-е изд., стереотип. М.: РУССО, 1999. 752 с.
2. Большой англо-русский политехнический словарь: В 2 т. Около 200 000 терминов / С. М. Борковский, А. Б. Борковский, В. А. Владимиров и др. 5-е изд., стереотип. М.: РУССО, 2001. Т. 1. 704 с., Т. 2. — 720 с.



(495) 105-35-60 | www.MVK.ru
МОСКВА, КВЦ «СОКОЛЬНИКИ»



Международный специализированный форум
лучевых технологий, лазеров, оптики,
электроники, мехатроники

28 – 31 марта 2006
Москва, КВЦ «Сокольники»



RayON
– Развитие электронно-лучевых
технологий и их применения в
современной науке и жизни



RayProm
– Лучи в промышленности и технике



RayMed
– Лучи в медицине: диагностика,
терапия, хирургия



RayService

www.rayform.ru | тел./факс: +7 (495) 105-35-60; e-mail: dea@mvk.ru

Организатор: выставочный
холдинг MVK

При поддержке: Физического института им. П.Н. Лебедева РАН
Института лазерной физики СО РАН
Института лазерных и сварочных технологий
Российской ассоциации лазерных машиностроительных систем
SPIE/RUS

Информационный
спонсор: Центр
лазерных
технологий

УДК 802.0(075.8)

К. Д. Яшин, канд. техн. наук, доц.,
Белорусский государственный радиотехнический
институт (г. Минск),
Е. В. Лацапнёв, аспирант,
Белорусский национальный технический
университет (г. Минск)

АНГЛО-РУССКИЙ ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ ПО МИКРО- И НАНОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКЕ

Даны термины и наиболее широко употребляемые словосочетания и аббревиатуры по микро- и наносистемной технике и технологии.

В

Back-grinding — утонение с обратной стороны. Процесс утонения подложки с уже сформированными на ней микроизделиями. Утонение проводится до скрабирования за счет обработки обратной (нерабочей, непланарной) стороны этой подложки. Технологически в это же понятие входит процесс разрезания (скрайбирования) полупроводниковой пластины для получения реальных устройств (микрочипов).

Backside patterning — формирование рисунка с обратной стороны подложки. Нанесение изображения с обратной (нерабочей, непланарной) стороны пластины с помощью масок (литографии). При этом используется слой (пленка) нитрида кремния. Si_3N_4 сформирован на обратной стороне подложки еще на более ранних этапах технологического процесса. По этой технологии слой нитрида кремния протравливается по рисунку маски в процессе последующей литографии, проводимой по непланарной стороне полупроводниковой подложки.

Baked — некоторое отвлеченное понятие, обозначающее возврат, возвращение, испарение, обратный процесс, обратное явление или процесс, идущий вспять. Понятие используется для характеристики пленок, например, тонких пленок красок. Пленки нагреваются для ускорения высыхания (испарения разбавителя, растворителя), активизации полимеризации или активизации химической реакции между составляющими компонентами. Цель одна — формирование твердого структурного слоя жесткой пленки.

Bandwidth — ширина полосы пропускания, ширина спектра. Это разница между верхней и нижней частотой среза фильтра. Для аналоговых сиг-

налов ширина полосы пропускания — это ширина, обычно измеренная в герцах, полосы частот $f_2 - f_1$ (верхняя и нижняя частота). Это понятие также может использоваться для описания сигнала как наименьшая полоса частот, внутри которой сигнал может уместиться. Обычно обозначается как B , W , или BW . Тот факт, что реальная полоса частот сигналов имеет как положительные, так и отрицательные значения, приводит к путанице. Для разрешения этой путаницы используется следующая формула: $B = 2W$, где B — полная полоса частот и W — положительная полоса частот. Ширина полосы пропускания в электронном фильтре — это часть частотной характеристики фильтра, лежащая в пределах 3 dB , сравниваемая со средней (центральной) частотой его пика. В обработке сигналов или в теории управления ширина полосы пропускания — это частота, при которой коэффициент усиления системы с обратной связью (замкнутой системы) понижается до 3 dB . Для цифровых сигналов выражение "ширина полосы пропускания" также используется для обозначения количества информации, передаваемого через цифровое соединение за заданный период времени и измеряемого в битах или байтах.

Batch fabrication — групповой метод производства. Производственный процесс, в течение которого одновременно изготавливается большое число устройств. Это периодически повторяющийся процесс.

BAW sensor — сенсор на объемных акустических волнах. Устройство, используемое в технологии "электронного носа". Представляет собой кристалл кварца, селективно покрытый пленкой. Кристалл сконфигурирован как схема резонатора и имеет типичную основную частоту 10 МГц. Когда газы или пары вещества взаимодействуют с осажденной пленкой, некоторая их часть поглощается и становится причиной увеличения массы пленки. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению частоты сенсора и измеряется как выходной сигнал (характеристика).

Beam — луч, пучок. Луч света, луч лазера, пучок ионов какого-либо материала, пучок электронов, нейтронов и др.

Beam processing — лучевая обработка, обработка лучом. Процесс поверхностной или объемной обработки, использующий высокоплотные энергетические лучи. Например, обработка поверхности полупроводника рентгеновским, лазерным или электронным пучком.

Behavioral model — поведенческая модель. Высокоуровневое представление электронной конструкции микроизделия, которое описывает поведение различных модулей и блоков в конструкции, не касаясь технологии изготовления изделия. Поведен-

ческая модель имеет сниженный порядок дифференциальных уравнений, описывающих конструкцию, но это обеспечивается без существенной потери качества описания модели. Поведенческая модель обычно характеризует отклик микроустройства или микросистемы на определенный диапазон входных воздействий.

BioMEMS — биоМЭМС. МЭМС-устройства, применяемые в биотехнологии, или МЭМС-устройства, в работе которых используются биологические принципы и реакции. Пример — так называемая лаборатория на чипе. Микролаборатория (чип) включает в себя микроисполнительные устройства для прокачки жидких образцов. Чип содержит биологически активное сенсорное устройство, содержащее специальные биотинилированные антитела. Такой сенсор предназначен для диагностики раковых клеток или, например, для определения палочки Коха (возбудитель туберкулеза). Часто биочип снабжается собственным вычислительным устройством.

Bimetal — биметалл, биметаллический. Биметаллическая пластинка состоит из двух плотно соединенных слоев двух разнородных материалов с разными коэффициентами линейного расширения. Также микроустройства применяются при создании микроактюаторов движения или при создании сенсорных устройств (датчик температуры). При нагревании биметаллической пластинки слой металла с большим коэффициентом термического расширения (активный) удлиняется на большую величину, чем слой металла с меньшим коэффициентом линейного расширения (пассивный). В результате пластинка прогибается в сторону пассивного слоя и переключает контакты электрической цепи или выполняет работу по передвижению другого микрообъекта.

Biomimetics — биомиметика. Научное и прикладное направление в технике. Представляет собой создание таких устройств или создание таких функций каких-либо устройств, которые имитируют движение или механизмы движения живых организмов, либо имитируют функции живых организмов, либо копируют эти самые живые организмы. Пример: создание робота-разведчика в виде змеи (копирующего движение змеи).

Birds beak — птичий клюв. Название профиля окисления кремния. Наблюдается при проведении локального окисления в технологии создания изопланарной изоляции элементов микросхем или в LOCOS-процессе. Относится к недостаткам этих процессов. Это есть расширение слоев SiO_2 под слоем Si_3N_4 в ходе локального окисления кремния. Слой SiO_2 формирует структуру, в профиль похожую на птичий клюв.

Boat — лодочка. Держатель полупроводниковых пластин. Изготавливается из высокочистого кварца или монокристаллического кремния. Используется в диффузионных операциях (диффузионных печах) или операциях термического отжига (термообработка) в полупроводниковом производстве. Применяется также в процессах осаждения пленок Si_3N_4 и поликристаллического кремния из газовой фазы в реакторах пониженного давления. Лодочку можно использовать для транспортирования пластин между местами их обработки (межоперационная тара для транспортирования пластин); такая лодочка изготавливается из тефлона.

Bode plot — график Боде. Представляет собой комбинацию амплитудного и фазового графика. Амплитудный график Боде — это зависимость логарифма амплитуды от логарифма частоты. Используется в теории обработки сигналов для отображения передаточной функции или частотной характеристики линейной стационарной системы. Фазовый график Боде — это зависимость фазы от логарифма частоты. Обычно используется вместе с амплитудной диаграммой для оценки смещения частоты сигнала по фазе. Типичное применение графика (диаграммы) Боде — отображение частотной характеристики фильтра. В этом случае график Боде особенно полезен, поскольку сложные кривые, которые получаются на обычном графике линейной амплитудно-частотной характеристики, на графике Боде можно чаще всего аппроксимировать (представить) прямыми линиями. В технической литературе можно встретить другое толкование графика Боде (другое название — правило Тициуса—Боде). Это эмпирическая формула для приближенного определения расстояния r планет от Солнца (в астрономических единицах длины): $r = 0,4 + 0,3 \times 2^n$, где n — определенная величина для каждой планеты. Правило предложено Тициусом, но получило известность после работ Боде.

Bonding — соединение. Технология соединения подложки одного типа с подложкой другого типа. Пример: соединение кремниевой подложки со стеклянной.

Bond pad — контактная площадка. Металлизированные площадки из Al или Cu, расположенные на периферии (по периметру) чипа. Число площадок на одном чипе может достигать 100 и более. Используются для соединения чипа с контактом корпуса путем приварки к ним микропроводов из золота.

Boron etch stop technique — технология остановки травления бором. Остановка травления кремния n -типа проводимости при достижении области, легированной бором (p -область).

Boule — буля. Большая кремниевая чушка, вытянутая из расплава, которая затем подвергается

операциям для получения строго цилиндрической формы определенного диаметра. Современные бу-ли монокристаллического кремния достигают в диаметре 320 мм и имеют 2–3 м в высоту.

Boundary — граничный, граничащий. Напри-мер, слой, область, элемент, условие и т. д.

Boundary Element Analysis (BEA) — анализ гра-ничных элементов. В методах граничных элемен-тов задача анализа сводится к решению дискрет-ного аналога граничного интегрального уравне-ния. Методы граничных элементов применяются к решению задач гидродинамики, теории упругости и пластичности, теории фильтрации, механики разрушения и т. д. и сопоставляются с другими численными методами. Применяются в МЭМС- и НЭМС-расчетах.

Bow — измерение плоскостности подложки. Как и плоскопараллельность, относится к геометри-ческим параметрам этих изделий. Интенсивное раз-витие литографических процессов требует повыше-ния плоскостности полупроводниковых пластин.

Breaking strength — прочность на разрыв. На-пряжение, действующее в твердом материале в мо-мент, когда материал разламывается (разрывается) под действием внешней силы.

Buckminsterfullerene — бакминстерфуллерин. Сфера из 60 атомов углерода. Первый известный фуллерен. Очень устойчивая сферическая молеку-ла углерода C_{60} . Фуллерены — многоатомные мо-лекулы углерода C_n . Фуллерен — одна из четырех основных форм чистого углерода (три другие — графит, алмаз и карбин), представляет собой его аллотропную форму. Аллотропия — существова-ние одного и того же элемента в виде различных по свойствам и строению структур. Фуллерен получил свое название по имени американского архитекто-ра R. Buckminster Fuller, поскольку полая сфери-ческая структура молекулы напоминает о геодези-ческих куполах этого эксцентричного творца. Яв-ляется симметричной и самой большой молекулой из известных человеку. В этой молекуле, напоми-нающей покрывку футбольного мяча и имеющей структуру правильного усеченного икосаэдра, 60 атомов углерода располагаются на сферической поверхности в вершинах 20 правильных шести-угольников и 12 правильных пятиугольников. Впервые обнаружен в 1985 г. среди побочных про-дуктов выпаренного лазером графита, а выделен в 1990 г. Способ получения основан на термическом разложении графита. Распыление графита осуще-ствляется при пропускании через электроды тока с частотой 60 Гц, сила тока от 100 до 200 А, напря-жение 10–20 В. Камера заполняется гелием. При этом поверхность медного кожуха, охлаждаемого водой, покрывается продуктом испарения графи-

та, т. е. графитовой сажей. Если получаемый поро-шок соскоблить и выдержать в течение нескольких часов в кипящем толуоле, то получается темно-бу-рая жидкость. При выпаривании ее во вращаю-щемся испарителе получается мелкодисперсный порошок, масса его составляет не более 10 % от массы его исходной графитовой сажи. В нем со-держатся фуллерены C_{60} (90 %) и C_{70} (10 %). Фул-лерен является конструкционным блоком для но-вых экспериментальных материалов, поскольку он легче пластика и прочнее стали, материал может проводить тепло и электричество. Применяется в медицине, МЭМС- и НЭМС-технологиях.

Buckyball — бакиболл. Сокращенное название Buckminsterfullerene.

Buffered Oxide Etch (BOE) — травление оксида SiO_2 в буферном растворе. Метод жидкостного травления SiO_2 , который использует травящий рас-твор, содержащий плавиковую кислоту HF и соль фторид аммония NH_4F . NH_4F применяется для су-щественного снижения скорости травления SiO_2 . Цель — получение более воспроизводимых резуль-татов травления оксида по сравнению с травлени-ем в "чистой" плавиковой кислоте. Но главная цель использования буферного раствора — "защитная". HF протравливает SiO_2 , а NH_4F , повышая pH рас-твора, защищает фоторезист от травления.

Build-in — встроенный в ... Например, встроен-ный в чип МЭМС-изделия дополнительный дат-чик температуры.

Bulk micromachining — объемная микрообработ-ка, формирование объемных микробалок метода-ми микрообработки. Технологически представляет собой формирование структуры микробалок непо-средственно в теле подложки методами травления.

Bumping — формирование столбиковых выво-дов. Метод сборки МЭМС. Нацелен на миниатю-ризацию изделий. Заключается в формировании контактов с выводами в виде металлических стол-биков, по форме напоминающих цилиндры.

Buried layer — скрытый слой. Расположенный в теле подложки низкоомный n^+ -слой. "Захоро-нен" под эпитаксиальным слоем в нижней части коллекторной области. Формируется, как правило, имплантацией и диффузией Sb или As. Служит для управления сопротивлением тела коллектора, а так-же в качестве резисторов биполярных микросхем.

Burn-in — испытания на принудительный отказ. Методология в теории надежности. Максимальная нагрузка (например, токовая, температурная, виб-рационная или иная) изделий, часто запредельная. Цель — добиться быстрого отказа и выявить наи-более "слабые места" изделий в целях их последую-щего усиления.

АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

В этом номере мы продолжаем публикацию аннотационных отчетов, полученных в инициативных научных проектах в области физики, математики, информатики, механики, химии и биологии и поддержанных Российском фондом фундаментальных исследований (РФФИ) по итогам конкурса 1999 г. Эти отчеты представляют определенный интерес для специалистов в области микро- и наносистемной техники. Общий список работ опубликован в "Информационном бюллетене РФФИ", № 7, 1999 г. (<http://www.rfbr.ru>).

Исследование термодинамических свойств и структуры растворов и кристаллогидратов неорганических солей, диспергированных в монодисперсных нанопорах: размерные эффекты

Номер проекта: 99-03-32312
Год представления отчета: 2002

Синтезированы новые пористых матрицы:

- силикатные мезопористые материалы типа МСМ в виде монодисперсных параллельных цилиндров диаметром $3,9 \times 0,2$ нм;
- столбчатые глины с монодисперсными плоскими микропорами размером $1,1 \times 0,1$ нм;
- расширенный вермикулит;
- композиты на основе цеолита ZSM-5 и слоистого силиката, наращенного на поверхность этого цеолита.

При этом путем подбора добавок удалось добиться устойчивости этих матриц в водных растворах электролитов. Пористая структура матриц изучена методами БЭТ и ВЖН, просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии. В эти матрицы (и для сравнения — в обычные носители типа мезопористых силикагеля и оксида алюминия) введены неорганические соли (CaCl_2 , MgCl_2 , LiBr , MgSO_4 и NaSO_4). Для полученных композитов изучены общие закономерности сорбционного равновесия с водяным паром, измерены изостерические и калориметрические теплоты сорбции воды. Показано, что сорбционные свойства кристаллогидратов и растворов дисперсных солей отличаются от таковых для массивного состояния и зависят от пористой структуры и химической природы матрицы-хозяина.

Впервые установлено, что в матрице расширенного вермикулита, которая отличается от остальных наличием макропор, образуется кристаллогидрат $\text{CaCl}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ с $n = 1/3$, который стабилен в широком интервале температур. Показано, что при $n > 4$ для всех изученных матриц в порах образует-

ся раствор соли, для описания активности воды в котором предложено модифицированное уравнение БЭТ.

Методами ЯМР- и ИК-спектроскопии изучено состояние сорбированной воды и переход "плавление—отвердевание" для раствора соли в порах. Обнаружено "пороговое" влияние количества сорбированной воды на теплопроводность компонентов на основе CaCl_2 , MgCl_2 и LiBr в матрице силикагеля и оксида алюминия — теплопроводность резко возрастает, когда образуется непрерывная фаза (геометрическая связанность) раствора соли, что описано с помощью модели Лыкова—Бьюрстрема.

На основе полученных данных разработана математическая модель сорбционного теплового насоса и показана перспективность применения для этих целей синтезированных сорбентов. Для сорбентов CaCl_2 и LiBr в порах МСМ, силикагеля и Al_2O_3 получены значения коэффициента использования теплоты, равные 1,6 для нагрева и 0,65 для охлаждения. Показана перспективность использования композитов "соль в пористой матрице" для осушки газов, исследованы закономерности этого процесса в проточном адсорбере и даны рекомендации по его оптимизации.

Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН

Наноструктурированные органические сетки, содержащие функциональные группы, молекулы и частицы

Номер проекта: 99-03-32400
Год представления отчета: 2002

Для эффективной реализации широких возможностей молекулярного дизайна проведен синтез двумерных органических сеток и на их основе созданы наноструктурированные композитные системы, способные выполнять заданные физические, химические и биологические операции. Реализо-

ван новый принцип молекулярного дизайна полимерных систем — принцип самоиммобилизации реакционноспособных молекул и наночастиц в пленарной сетчатой матрице. Изучены структура и свойства индивидуальных и сложных сеток, полученных с помощью органических и неорганических инициаторов полимеризации и эпоксидных олигомеров различной природы и функциональности. Выявлен топохимический характер двумерных реакций полимеризации и показано, что их скорость на несколько порядков ниже по сравнению со скоростью этих реакций в блочном образце. Выполнены термодинамические и кинетические исследования закономерностей распознавания и связывания катионов металлов и наночастиц из субфазы монослоями Ленгмюра из линейных и циклических дифильных соединений — "гостевых" молекул сетчатых матриц. Новый эффект обнаружен при изучении старения монослоев жирной кислоты и ее солей на поверхности воды — аномальный рост поверхностной вязкости, обусловленный перекристаллизацией монослоя. В случае макроциклических лигандов и катионов металлов реакция комплексообразования в монослое протекает по сложному многостадийному механизму, а ее скорость зависит от pH субфазы и фазового состояния монослоя. Предложены схемы хода реакций в конденсированных фазах монослоев и выявлены механизмы образования комплексов. Проведен анализ поведения смешанных монослоев этих соединений и эпоксидных олигомеров и созданы наноструктурированные сетки с интегрированными в них функциональными объектами. Определено влияние иммобилизации функциональных частиц на эффективность выполнения ими заданных операций. Впервые осуществлен перенос композитных сетчатых монослоев на твердые подложки методом Ленгмюра—Блоджетт и созданы многослойные пленочные системы. Продемонстрирована их высокая структурная, термическая и химическая стабильности, обеспечивающие возможность использования в качестве асимметричных мембран, транспортных каналов и сенсоров. На основе закрепленных в двумерной сетке макроциклических аминов собран рабочий элемент сенсора на катионы переходных металлов, обладающий высокой чувствительностью, быстродействием и скоростью регенерации. Таким образом, в результате выполнения проекта созданы основы для перехода к практической реализации возможностей молекулярного дизайна.

Научное учреждение Институт физической химии РАН

Теоретические и экспериментальные исследования наноструктур на подложках

Номер проекта: 99-03-32373
Год представления отчета: 2002

Была исследована структура микрокластеров серебра на поверхности твердого тела (в качестве возможного примера могут служить галогениды серебра). Число атомов в микрокластере варьировалось от 3 до 13, взаимодействие между атомами в кластере моделировалось с помощью эмпирических потенциальных функций. В парном потенциале, описывающем взаимодействие атомов кластера и атомов поверхности, учитывалась его двумерная периодичность. С помощью эмпирических потенциалов методами глобальной минимизации была определена энергия кластеров с достаточно большим числом частиц (порядка нескольких сотен). Эти данные затем использовались для теоретического расчета коэффициента поверхностного натяжения серебра в вакууме с помощью специальной модели, позволяющей определить этот коэффициент для кластеров с произвольным числом атомов. Начиная с числа атомов, равного 10, этот коэффициент с хорошей степенью точности равен 0,86 Дж/кв. м.

Проведены экспериментальные электронно-микроскопические исследования ультрамелкозернистых галогенсеребряных эмульсий, позволившие определить распределение частиц бромистого серебра по размеру и рассчитать размер частиц фотолитического серебра, возникшего в результате фотолиза. Проведено сопоставление полученных электронно-микроскопических данных с результатами спектрофотометрического анализа коллоидных центров окраски.

Получены экспериментальные данные по скоростному химическому проявлению ультрамелкозернистых кристаллов AgBr диаметром 15—20 нм при одновременном воздействии на них мощной актиничной вспышки. Для исследования был использован метод флеш-фотолиза.

Показано, что такие кристаллы могут использоваться для создания оптических приборов с переменным светопропусканием в миллисекундном временном интервале.

Выполнен анализ экспериментальных данных модельных фотографических материалов и компонентов фотографического слоя в качестве интегрированных химических систем (ИХС) или компонентов этих систем.

Обсуждены различные примеры ИХС: модельные фотосенсибилизаторы на основе 2,2'-бипиридиновых и 1,10-фенантролиновых комплексов переходных, непереходных и редкоземельных металлов, оптические фильтры на основе ультрамелко-

зернистых кристаллов AgVg диаметром 10—20 нм, электрохимических индикаторов на основе электролитического восстановления серебра, микро-сенсоров с инъекцией электронов из катода в микрокристаллы AgVg при небольших разностях потенциалов и т. д. Предложен новый скоростной гель на основе солей серебра. Выполнен анализ размеров критических зародышей в различных буферных системах. Получены гистограммы распределения серебряных частиц по размерам в условиях эксперимента.

Государственное учебно-научное учреждение Химический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова

Поиск и молекулярный дизайн металлокомплексных и элементоорганических рецепторов для определения и выделения органических соединений

Номер проекта: 99-03-32826
Год представления отчета: 2002

В качестве рецепторов органических соединений, прежде всего — анионов карбоновых кислот, применен ряд производных фталоцианина, в том числе — сдвоенные металлофталоцианаты. Предложены ионоселективные электроды (ИСЭ) на основе фталоцианатов алюминия и олова для определения салицилата и ацетилсалицилата. Синтезированы новые биядерные фталоцианаты никеля, меди и цинка типа <полуоткрытая раковина>; на основе этих соединений и гекса(трет-бутил)бифталоцианата димеди (II) разработаны ИСЭ на анионы дикарбоновых кислот, в том числе — терефталат. Показана в ряде случаев возможность замены фталоцианина более простыми лигандами (оксихинолин, гидроксамовые кислоты), причем удается использовать металлокомплексы, полученные *in situ*, в мембране ИСЭ. В качестве рецепторов катехоламинов, фенолоксилов и аминокислот исследованы различные борсодержащие соединения.

Разработаны способы выделения и определения катехоламинов, определения анионов фенолоксилов с помощью арилборных кислот. В качестве ионофоров успешно использованы борные комплексы гидроксамовых кислот. Борсодержащие рецепторы использованы для экстракции аминокислот; показано, что для эффективной экстракции необходимо присутствие краун-эфира.

Количественной экстракции аминокислот, в том числе наиболее гидрофильных, удалось добиться, применив новый тип растворителя — ионную жидкость. Разработанный ранее вариант метода молекулярной механики на основе модели Гиллеспи—Киперта распространен на широкий круг металлокомплексных и элементоорганиче-

ских соединений, в том числе — на соединения бора. Расчеты методом молекулярной механики использованы для анализа строения комплексов и выработки рекомендаций о структуре рецепторов. Выполнен ряд методических работ теоретического характера.

Государственное учебно-научное учреждение Химический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова

Реакции механохимического синтеза сложных оксидов тяжелых металлов и структура новых метастабильных фаз

Номер проекта: 99-03-32733
Год представления отчета: 2002

Методами рентгенофазового анализа изучены реакции механохимического синтеза, оценены энергии полупревращения $E_{1/2}$, определена структура кристаллических продуктов и изучено термическое поведение ряда метастабильных фаз в следующих смесях оксидов металлов: $PbO + HgO$, $2PbO + Sb_2O_3$, $nPbO + Bi_2O_3$, $2PbO + Ti_2O_3$, $nPbO + PbO_2$, $PbO + ZrO_2$, $PbO + VO_2$, $nPbO + V_2O_5$, $2PbO + Sb_2O_5$, $2PbO + Nb_2O_5$, $2PbO + Ta_2O_5$, $Pb_3O_4 + PbO_2$, $Pb_3O_4 + ZrO_2$, $2CdO + Sb_2O_3$, $nCdO + Bi_2O_3$, $2CdO + Ti_2O_3$, $nCdO + PbO_2$, $CdO + Bi_2O_4$, $CdO + ZrO_2$, $2CdO + Sb_2O_5$, $2CdO + Nb_2O_5$, $2CdO + Ta_2O_5$, $2HgO + Sb_2O_3$, $nHgO + Bi_2O_3$, $nHgO + PbO_2$, $HgO + Bi_2O_4$, $HgO + ZrO_2$, $2HgO + Sb_2O_5$, $2HgO + Nb_2O_5$, $2HgO + Ta_2O_5$, $ZnO + PbO_2$, $CaO + Sb_2O_3$; $CaO + Bi_2O_3 + Sb_2O_3$, $CdO + PbO + HgO + PbO_2 + Bi_2O_3 + Ti_2O_3$.

Системы с PbO_2 из-за быстрого восстановления фактически являлись тройными. В соответствии с предсказанием модели реакционной зоны значения $E_{1/2}$ для различных продуктов механохимического синтеза разделились на три группы:

- сверхбыстрый синтез ($E_{1/2} \sim n$ МДж/кг), особенно в системах с Pb, Bi, Hg, протекающий в первичных актах через образование промежуточного динамического состояния с роликовым массопереносом;
- синтез с промежуточной скоростью ($E_{1/2} \sim n_{10}$ МДж/кг), протекающий во вторичных актах с диффузионным массопереносом в режиме деформационного массопереноса;
- синтез сложных оксидов, лимитируемый стадией восстановления оксидов тяжелых металлов, ($E_{1/2} \sim n_{10-100}$ МДж/кг).

Как и предсказывалось, не обнаружено взаимодействие при разумных временах обработки в системах с участием ZrO_2 , где разница в твердости по Моосу больше или равна 4.

Обнаружено образование более 20 новых соединений, практически для всех из них предложены структуры, которые описывают эксперименталь-

ные рентгенограммы хорошим или удовлетворительным фактором расходимости $R = 315 \%$. Оказалось, что список возможных структурных типов резко ограничен: к известным структурам перовскита, шпинели, шеелита впервые добавлены флюорит, пирохлор, каменная соль, Cd_2PbO_4 , K_2NiF_4 , $PbBi_{12}O_{20}$, а также новый структурный тип $Hg_2Bi_2O_4$.

Кроме того, ряд новых структур можно отнести к перовскиту лишь условно. Все эти структурные типы толерантны к изменению состава, т. е. все продукты, наблюдаемые РФА, являются твердыми растворами с широкой вариацией состава. Какая-либо зависимость $E1/2$ от структурного типа продукта не обнаружена; это доказывает, что в основном взаимодействие идет через динамическое состояние, а относительно упорядоченный "кристаллический" продукт образуется в результате релаксации после снятия нагрузки. Обобщение всех имеющихся структурных данных не противоречит основному закону кристаллохимии Гольдшмидта. Однако правила Полинга для определения устойчивости кристаллических структур часто нарушаются и практически малополезны для метастабильных сложных оксидов тяжелых металлов. Ряд метастабильных фаз оказались устойчивыми при нагреве вплоть до сублимации, что подтверждает перспективы механохимического керамического метода для создания уникальных функциональных наноматериалов.

Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН

Фазовые равновесия в растворах самоорганизующихся комплексов полиэлектролит—ПАВ

Номер проекта: 99-03-33403
Год представления отчета: 2002

Проведены систематические исследования поведения водных растворов нестехиометричных комплексов полиэлектролит—ПАВ (НПКК), образованных линейными синтетическими поликатионами (полидиаллилдиметиламмоний хлоридом и поли-*N*-этил-4-винилпиридиний бромидом) с додецилсульфатом натрия и полианионами (натриевыми солями полиакриловой, полиметакриловой и полистиролсульфо кислот) с алкилтриметиламмоний бромидами. Показало, что фазовое разделение в растворах наблюдаются только для комплексов, состав которых близок к предельному составу. Величина предельного состава комплексов (пред), определяется химической природой электро-

лита и длиной алифатического радикала иона ПАВ. При Z порядка $Z_{пред}$ растворы всех изученных НПКК характеризуются фазовыми диаграммами с нижней критической температурой смешения, что указывает на значительный вклад гидрофобных взаимодействий алифатических заместителей ионов ПАВ в свободную энергию образования раствора.

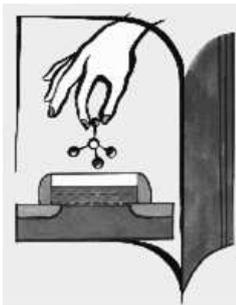
Установлено, что фазовое разделение в растворах всех изученных НПКК сопровождается химической реакцией перераспределения ионов ПАВ по макромолекулам линейного полиэлектролита, в результате которого в концентрированной фазе обнаруживается набухший комплекс стехиометричного состава, а в разбавленной — НПКК с $Z = Z_{пред}$.

Впервые показано, что фазовому расслоению в растворах НПКК с Z порядка $Z_{пред}$ предшествует протяженная область формирования устойчивых коллоидных дисперсий, размеры частиц которых возрастают с ростом температуры и концентрации раствора. При этом кривая точек помутнения в таких системах соответствует границе истинных и коллоидных растворов.

Впервые показано, что уменьшение степени полимеризации линейного полиэлектролита приводит к сокращению области существования растворимых ПКК.

Впервые изучено и выявлено определяющее влияние концентрационного режима раствора полиэлектролита на характер фазового разделения в растворах НПКК. Показано, что при концентрации полиэлектролита в растворе выше концентрации кроссовера фазовое разделение в системе происходит по принципу синерезиса геля. Методом спинового зонда изучено влияние фазового состояния комплексов на морфологию внутримолекулярной мицеллярной фазы. Показано, что для большинства изученных систем морфология мицеллярной фазы комплексов остается неизменной при переходе комплекса из разбавленной в концентрированную фазу и не зависит от концентрационного режима раствора полиэлектролита. Напротив, для комплексов на основе ПСС морфология внутрикомплексной мицеллярной фазы существенно зависит как от состава, так и от фазового состояния комплекса: нерастворимые комплексы характеризуются значительно меньшей степенью упорядоченности и большей молекулярной подвижностью ионов ПАВ во внутрикомплексной мицелле, чем растворимые комплексы.

Государственное учебно-научное учреждение Химический факультет МГУ им М. В. Ломоносова



Symposium and School on Nano and Giga Challenges in Electronics and Photonics:

from Atoms to Materials to Devices
to System Architecture

Phoenix, Arizona, March 12-16, 2007

<http://asdn.net/ngc2007/>



Co-chairmen: *Herbert Goronkin, Stephen Goodnick, Anatoli Korokin*

Invited Speakers: *D. Basov, T. Ebbesen, K. Matsumoto, B. Chichkov, M. Vazquez, K. Lian, G. Fagas, S. Williams, H. Iwai, A. Dediu, L. Chernozatonskii, A. Efros, M. Reed, S. Mao, A. Nitzan, T. Fujisawa, D. Strukov, H. Baranger, D. Porath, M. Werner, T. Otsuji, H. Guo, N. Bloembergen, J. Baumberg, O. Sankey, J. Gale, M. Buttiker, K.-B. Kim, M.T. Niemer, F. Rosei*

Advisory Board: *P. Avouris, E. Calleja, S. Cristoloveanu, D. Fitzmaurice, D. Dascalu, D. Ferry, P. Mangat, R. Chau, H. Yokoyama, R. Schott, J. Sone, V. Zhirnov, Y. Hirayama, N. Peyghambarian, A. Glass, M. Halik, T. Hattori, A. Wild, S. Luryi, J. Raj, J. Xu*

Program Committee: *G. Bersuker, A. Bratkovski, M.L. Ciurea, A. Daboli, T. Frauenheim, O. Fesenko, K. Yamashita, W. Porod, G. Maracas, K. Likharev, Yu. Raikher, P. Mueller, O. Elyukhina, T. Thornton, T. Naito, Bo Varga, J. Druker, P. Krstic, A. Zayats, N.J. Tao, V. Ryzhii, J. Sydow, R. Liu*

Organizing Committee: *L. Fonseca, K. Olafsdottir, M. Oseeva, T. Kar, J. Labanowski, D. Henderson, M. Stoker, J. Feilke, H. Finkelstein, S. Tsarjova*

Informational technology based on microelectronics is reaching a new revolutionary stage: Miniaturization of electronic devices is approaching atomic dimensions, interconnect bottlenecks are limiting circuit speeds, new materials are being introduced into microelectronics manufacture at an unprecedented rate, and alternative technologies to mainstream CMOS are being considered. GIGAntic challenges for the continuing growth of information technologies beyond the fundamental physical limits in scaling electronic devices to smaller and smaller sizes has sparked an unprecedented level of interdisciplinary and international cooperation between industrial and academic researchers, companies, and countries, including former political and military rivals as well as current commercial competitors. The series of the conferences on Nano and Giga Challenges (NGC) in electronics and photonics has been launched to bridge today's micro-, tomorrow's nano- and future molecular electronics from the fundamental science prospective to development of novel technologies.

The third Nano & Giga forum (NGC2007) will be held in Phoenix, Arizona March 12-16, 2007, following the first in Moscow, Russia (NGCM2002) and the second in Krakow, Poland (NGCM2004). The conference will be hosted by Arizona State University in cooperation with Nano & Giga Solutions and local, national and international organizations, Universities, research centers, companies and governmental agencies. NGC2007 invites academic and industrial researchers to present tutorial, expository and original research papers dedicated to the science and advanced technology related to the merger of micro- and nanoelectronics and photonics. The industry showcase will enable leading edge commercial and pre-commercial products from start-up, early-stage, and corporate projects to present their business cases, to exhibit, and to sponsor this conference.

For further information and registration visit our web site at: <http://asdn.net/ngc2007/>

Золотые наноштыри: будущее оптической диагностики кровеносных сосудов

С наступлением эры нанотехнологий диагностика кровеносной системы может претерпеть изменения. Это связано, в первую очередь, с появлением новых методов мониторинга состояния кровеносных сосудов. Недавно ученым из университета Пэрдью удалось использовать короткие отрезки нанопроводников (наноштыри) в лазерном сканировании кровеносных сосудов (рис. 1, см. четвертую сторону обложки).

Преимущество в использовании наноматериалов состоит в повышении их яркости при освещении ткани лазером. Так, наноштыри в 60 раз ярче флуоресцентных родаминовых меток, используемых сейчас в диагностике, а их малые размеры (60 нм в длину, 20 нм в ширину, что в 200 раз меньше, чем красная кровяная клетка эритроцит) позволяют достичь высокого разрешения сканирования. С их помощью можно будет изучать отдельные клетки, не говоря уже о сосудах.

Как говорит один из ученых, Джи-Шин, новый метод диагностики поможет обнаружить рак на ранней стадии развития. "Одно из существенных затруднений в световой диагностике — то, что свет плохо проходит через ткани, — объясняет профессор химии Александр Вей. — Но если использовать ближний инфракрасный спектр излучения в качестве диагностического средства, то это позволяет довольно хорошо исследовать ткани и кровеносные сосуды".

Золотые наноштыри идеально подходят для данного спектра излучения в качестве мониторинговых агентов. Их появление позволяет использовать технику, называемую двухфотонной флуоресценцией. Ее суть сводится к тому, что на наноштырь при диагностике попадают два фотона, что существенно увеличивает контраст изображения и его яркость. По словам ученых, благодаря этому эффекту они могут использовать нелинейную оптику для улучшения качества изображения.

В лабораторных тестах исследователи внедрили наноштыри в кровеносную систему мыши и наблюдали структуру ее кровеносных сосудов, расположенных в тканях уха. Как оказалось, наноматериалы в 58 раз превышают по свечению родаминовые метки, тоже использующие технику двухфотонной флуоресценции. Диагностика мыши закончилась уже через полчаса — наноштыри были выведены из крови почками. Такую же технику диагностики

можно использовать при нахождении раковых опухолей. При этом диагностика будет точной и быстрой и не причинит вреда организму человека.

Работа ученых поддержана Национальным институтом здравоохранения США и Наноцентром Бёрка.

Источник:

Purdue News: Purdue's gold nanorods brighten future for medical imaging

"Интернет Вещей" — уже скоро

Подключение всех значимых физических объектов к Сети произойдет раньше, чем мы думаем. На Всемирном саммите по информационному обществу в Тунисе состоялось обсуждение концептуального доклада на эту тему.

Представьте, что дверной замок сообщает чайнику и лампочке, что вы входите в квартиру. Цифровой видеомэгнитофон сразу включает видеозапись, которую он сделал с ТВ-тюнера во время вашего отсутствия, и ставит ее на паузу. Телевизор ждет, когда в комнате включится свет, чтобы начать трансляцию сохраненной телепередачи. А вы, не обращая внимания на привычно загудевшие вокруг устройства, просто входите в квартиру, берете готовый чай и садитесь посмотреть, как сыграла любимая футбольная команда во время вашего отсутствия.

Концепция вездесущих вычислений и цифрового дома отнюдь не нова. Но, поскольку конвергенция технологий происходит прямо сейчас, она может стать реальностью раньше, чем мы думаем. Таков главный вывод концептуального доклада "Интернет Вещей", презентация которого состоялась на специальной сессии Всемирного саммита по информационному обществу.

Авторы отчета выделяют четыре ключевые технологии, находящиеся на разных стадиях своего развития, которые обеспечат реализацию вездесущих вычислений и объединение окружающих предметов в единую вычислительную Сеть. Это метки радиочастотной идентификации (RFID), сенсоры, встроенный интеллект и нанотехнологии. Последние позволят существенно уменьшить размеры компьютеров, используемых в бытовой технике. Под встроенным интеллектом подразумеваются невидимые вычислительные системы. Компьютеры станут такими миниатюрными, что их можно будет встроить в любое устройство. Эта тенденция наблюдается уже сейчас, когда компьютеры

встраиваются в мобильные телефоны, фотоаппараты и даже наручные часы. Нанотехнологии будут способствовать дальнейшей миниатюризации.

Уже сегодня за состоянием знаменитого моста в Сан-Франциско следят несколько сотен МЭМС-датчиков, отправляя данные по сети.

Через несколько лет, например, одежда со встроенными чипами сможет обмениваться информацией с оборудованной сенсорами стиральной машиной насчет цветной стирки и желательной температуры воды, а рюкзак сможет напомнить хозяину, если он забыл что-то в него положить.

Результатом станет появление в Интернете миллиардов новых "пользователей" — объектов, которые совершенно вытеснят человека в смысле создаваемого трафика. Современная сеть людей превратится в сеть вещей, и это будет естественным этапом ее эволюции.

"Существуют проблемы, такие как стандарты и управление этими ресурсами, но мы приближаемся к миру, в котором многие вещи вокруг нас скоро будут общаться друг с другом без малейшего нашего участия", — сказала на презентации доклада Лара Шривастава (*Lara Srivastava*), аналитик по телекоммуникационной политике Международного телекоммуникационного союза и главный автор доклада.

Во время развернувшихся дискуссий свои мнения высказали различные эксперты. Так, директор исследовательской лаборатории Массачусетского технологического института Николас Негропonte (*Nicholas Negroponte*) подчеркнул, что большим преимуществом Интернета вещей станет устойчивость к поломкам. Окружающие вещи будут почти идеальными — в случае поломки они смогут или починить друг друга, или оперативно вызвать необходимую помощь.

Конечно, в таком мире особенно остро проявятся проблемы приватности, анонимности и государственного контроля над гражданами. Над решением этих проблем нужно думать уже сейчас.

Источник:

BBC News: UN predicts 'internet of things'

Центр нанотехнологий откроется в Югре

Югорский центр нанотехнологий (ЮЦНТ) открылся 2 ноября в Югорском научно-исследовательском институте информационных технологий. Центр создан при поддержке Министерства науки и образования РФ для решения научных задач в области технологии объектов, размеры которых сравнимы с размерами атомов или молекул.

"На базе центра будут проводиться научные исследования, связанные с задачами нефтегазового комплекса, микробиологии и медицины, обучение школьников и студентов", — сообщает ИА "Югра-Информ".

Достижения современной науки станут более доступными исследователям благодаря создаваемой базе данных наноструктур живой и неживой материи. Центр оснащен учебно-научной лабораторией по нанотехнологии производства ЗАО "Нанотехнология — МТД". В ее составе — универсальный сканирующий зондовый микроскоп "Солвер-R47", учебные рабочие места, укомплектованные СЗМ "NanoEducator" со специальным программным обеспечением.

На открытие ЮЦНТ приглашены специалисты Российского центра нанотехнологий (Москва, Зеленоград), представители нефтегазового комплекса, научных организаций и вузов. Сотрудники ЮЦНТ представят гостям лабораторную базу, расскажут о методах исследования, покажут результаты микроскопических исследований различных носителей информации, геологических минералов, полупроводниковых структур с атомным разрешением, органических и биологических объектов, продемонстрируют возможности нанолитографии для создания микротекстов, рисунков, текстур.

Источник:

ИА "Югра-Информ": Центр нанотехнологий откроется в Югре

Грант в 6,5 миллионов долларов позволит ускорить разработку медицинских имплантов

Ученые из Йельского университета получили дополнительный грант в размере 6,5 млн долл. на дальнейшее проведение исследований в области наномедицины. Проект исследователей также поддерживается Национальным институтом глаза и Национальным институтом здравоохранения. Эти работы проводятся правительством США в рамках национальной программы развития наномедицины.

Профессор Дэвид Ла Ван, один из руководителей междисциплинарной программы в области нейронаук Йельского университета, например, разрабатывает биомиметические нанопроводники, которые можно будет имплантировать в живые ткани человека.

Пятилетний грант предусматривает междисциплинарные проекты по моделированию и созданию наномедицинских приборов. Цель одного из проектов — разработка устройств ионного транс-

порта. При этом предполагается использовать как встречающиеся в природе наноструктуры, так и созданные искусственно. В природе за транспорт ионов отвечают специальные белки, находящиеся на поверхности клеточной мембраны.

Исследователи, вовлеченные в другой проект, разрабатывают, изготавливают и проверяют на биологическую совместимость новый тип биологической батареи (рис. 2, см. четвертую сторону обложки), пригодной для использования в различных имплантатах, например, в чипе искусственной сетчатки глаза. Специально для зрительных имплантов Ла Ван разрабатывает батарею, преобразующую световую энергию в электрическую. Так можно избежать использования заменяемых батарей, которые широко применяются сейчас в имплантатах.

"Для этого нам необходимо научиться управлять ионным транспортом на молекулярном уровне, что можно сделать только с помощью нанотехнологий, — говорит Ла Ван. — В недалеком будущем мы сможем создать такие импланты, которые функционально ничуть не уступают органам человека, это будет совершенно новый класс сложных биомиметических устройств". Напомним, что биомиметика позволяет создать биологически совместимые устройства, полностью имитирующие работу природных аналогов.

Команда ученых ведет исследования в нескольких направлениях, актуальных в современной наномедицине. Кроме биологически совместимых источников энергии программа гранта предусматривает проведение исследований в области биосенсоров, преобразователей энергии (тепловой или химической в электрическую) и осмотических насосов. Эта база необходима для разработки безопасных имплантов нового поколения, имитирующих функции человеческих органов. Также программой предусмотрены исследования в области тестирования имплантов на биологическую совместимость.

Источник:

EurekAlert: \$6.5M nanomedicine center includes Yale engineer

Матрица наномоторов, вращающихся от квантов света, позволит создать наноконвейеры

Создание молекулярных моторов, использующих различные принципы действия, — уже далеко не новость. Однако совсем недавно химикам из Нидерландов удалось синтезировать молекулярный ротор, с помощью которого можно будет создать сложную матрицу актюаторов, приводящихся

в движение светом. Ранее исследователи могли делать только одиночные химические и биологические роторы, поэтому данное открытие позволяет по-новому взглянуть на будущее развитие НЭМС и актюаторов, в частности.

Первый наноактюатор (рис. 3) ученые создали, присоединив алкен с геликоидальной структурой к золотой наночастице (Nature 2005, 437, 1337). Воздействуя с фотонами, ротор приводился в движение. При этом ученым удалось "заякорить" наночастицу на золотой подложке, что дает возможность набрать на золотой пластинке почти неограниченное число актюаторов. Так, простая пластинка может стать эффективным электромеханическим преобразователем световой энергии в механическую или электрическую.

Если же пластинку перевернуть так, чтобы актюаторы ложились роторами на любую гладкую поверхность, то пластинка начнет медленно перемещаться под воздействием света.

Как говорит Бен Л. Феринга, глава Нидерландских ученых из университета Гронингена, матрица актюаторов пригодится при конструировании сложных НЭМС-систем и наномашин.

"Уже то, что мы можем прикрепить мотор к почти любой поверхности, позволяет создать миниатюрные перевозчики грузов, которые будут использоваться в молекулярных конвейерах при автоматизированной сборке наномашин", — говорит Росс Келли, профессор химии из Бостонского колледжа.

Ранее Келли синтезировал химический наноак-

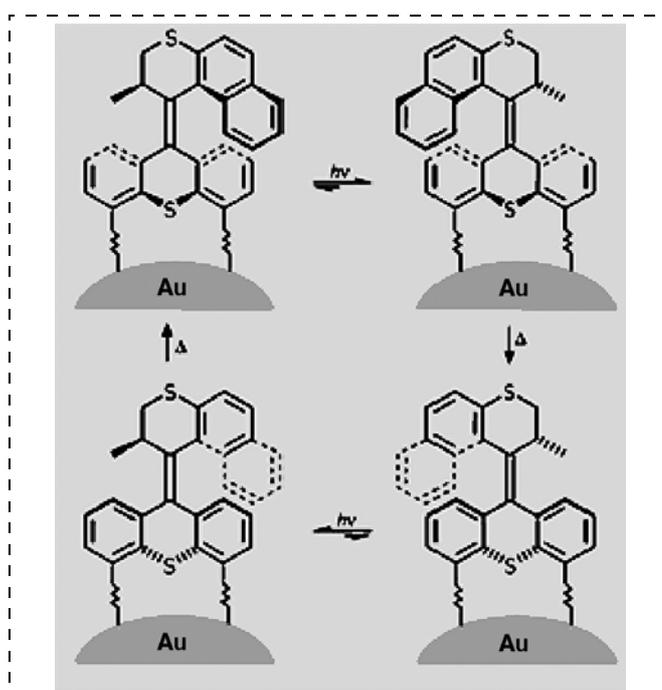


Рис. 3. Структурная формула и принцип действия алкенового наноактюатора

тюатор, который приводился в движение с помощью специальных химических соединений.

Феринга использовал две тиоловые группы для того, чтобы присоединить алкен к золотой наночастице. А две углеродные "ноги" прикрепили тиоловые группы к наночастице золота. Ученые таким образом исключили прямое электронное взаимодействие между актюатором и золотой подложкой.

Вращение ротора достигается с помощью фотоизомеразой двойной химической связи. Правда, иногда ученые наблюдали самопроизвольное вращение ротора вокруг связи. При получении кванта света ротор вращается на 180°. Еще один квант приводит к повторному вращению. Так можно добиться вращения ротора с дискретностью в 180°.

Как отметил Винченцо Бальзани, один из "конструкторов" молекулярных машин из Университета Болоньи (Италия), наномотор пока не производит никакой полезной работы. Но несомненно то, что наномотор приводится в движение светом, уже дает немало преимуществ при создании наномашин и нанокomпьютеров. Исследователи также заметили, что наномотор может пригодиться в системе памяти, которая может быть использована в нанокomпьютерах.

Источник:

Chemical And Engineering News: Molecular Motor Spins On Surface

Молекулярный автомобиль ездит под микроскопом

Ученые из университета Райса создали наименьшую в мире движущуюся наносистему — наномашину, которая ездит как настоящие легковые машины (рис. 4, см. четвертую сторону обложки). Наши постоянные посетители, знакомые с современным состоянием нанотехнологий, могут сначала в это не поверить, так как до сих пор ученым не удавалось сделать что-то сложнее простого актюатора или сенсора.

Но на самом деле эта большая молекула-наносистема, состоящая из трехсот атомов, похожа на машину только наличием четырех "колес" и способом передвижения. В качестве колес наносистемы служат фуллерены — молекулы C₆₀, связанные химическими связями с "каркасом" машины. Ширина наноавтомобиля 4 нм — чуть больше, чем толщина ДНК. Он имеет раму и оси, к которым и присоединены химическими связями фуллерены.

"Синтез и тестирование наномашин и других наносистем поможет значительно ускорить производство таких сложных структур, как нанофабрики или нанороботы, методом сверху-вниз, — говорит Джеймс М. Тур, профессор химии. — Эти машины

помогут нам освоить базовые правила работы в наном мире: транспортировки нанообъектов, взаимодействие между ними и сборка микроблоков из отдельных молекул".

Другие научные группы уже строили объекты нанометрового масштаба, напоминающие внешне автомобили, однако это первый пример, когда полученная молекулярная конструкция действительно катилась (даже не скользила) по поверхности так же, как катятся автомобили на своих колесах.

Исследователи придумали оригинальный метод приведения в движение наномашин: они нагрели ее до 200 °С, что вызвало вращение фуллеренов на химических связях, соединяющих их с "рамой машины". От вращения четырех молекул наносистема пришла в движение и смогла катиться по плоской золотой поверхности (рис. 5, см. четвертую сторону обложки).

Чтобы убедиться в том, что машина действительно "ездит", а не скользит, и ее передвижения связаны с вращением фуллеренов-колес, ученые использовали сканирующую туннельную микроскопию (СТМ). Каждую минуту ученые получали СТМ снимки машины, доказывающие, что колеса действительно вращаются, и благодаря их вращению машина может ехать!

Более того, наномашину можно подцепить зондом микроскопа и перемещать с места на место. Интересно то, что она легче входит в соединение с зондом, когда захват происходит по направлению движения машины.

Восемь лет группа ученых совершенствовала технику производства наномашин, и вот, наконец, их попытки увенчались успехом. Удалось найти решение проблемы несовместимости палладиевых катализаторов, помогающих собирать раму машины, с молекулами фуллеренов, которые ингибируют эту реакцию. Но методом проб и ошибок это затруднение все же было преодолено.

Ученые уверены: машина сможет перевозить молекулярные грузы в различных направлениях, что можно использовать в наноконвейерах, нанофабриках и других сложных наносистемах. Также она может служить платформой для различных мобильных наносистем: нанороботов, наноманипуляторов. В качестве энергетической подпитки машин исследователи хотят использовать направленные пучки фотонов вместо нагревания среды, в которой находятся машины. Так появится возможность ими управлять и координировать их перемещения с высокой степенью точности.

Источник:

EurekAlert: Rice scientists build world's first single-molecule car

Составил Ю. Свиденко

Оптокомпоненты Sharp в соответствии с RoHS не содержат вредных веществ

Гамбург, 8 ноября 2005 — Sharp Microelectronics отказывается от использования вредных веществ при производстве оптоэлектронных элементов. К ним относятся свинец (Pb), кадмий (Cd), ртуть (Hg), 6-валентный хром (Cr6+), полибромированные бифенилы (PBB) и дифениловый эфир (PBDE). Таким образом, все оптокомпоненты Sharp уже сейчас соответствуют Директиве ЕС 2002/95/EG по ограничению применения опасных веществ (RoHS), которая вступает в силу 1 июля 2006 года.

"Первой вехи мы достигли уже в апреле этого года — с этого времени мы можем предлагать оптокомпоненты, которые в соответствии с директивой RoHS относятся к классу "не содержащих вредных веществ". Тем самым мы поддерживаем наших клиентов в реализации Директивы RoHS и создаем для них условия для своевременного до конца июня 2006 года перевода их продуктов на соответствие критериям RoHS и возможности их продажи во всех странах ЕС", — заявляет Андреас Бисс, маркетинг-менеджер по оптокомпонентам в Sharp Microelectronics Europe.

Большая часть названных вредных веществ уже издавна не применяется при производстве оптоэлектронных компонентов Sharp. Только небольшая доля свинца использовалась при покрытии контактов выводов элементов. Эти материалы, содержащие свинец, с апреля 2005 года были заменены соответствующими веществами, отвечающими требованиям RoHS.

Для отличия от моделей прежних выпусков, не соответствующих RoHS, все элементы имеют модифицированные номера моделей. В дополнение к этому на всех упаковках содержится специальная отметка соответствия Директиве ЕС. И после за-

мены свинцовосодержащих материалов в покрытии Sharp и в дальнейшем будет обеспечивать высокий стандарт качества своих компонентов. Благодаря таким оправдавшим себя технологиям, как, например, запатентованная "Double Transfer Mold Technologie", которая применяется при изготовлении многих оптоэлементов Sharp, эти компоненты выдерживают и требующиеся для новых материалов повышенные температуры пайки до 260 °С.

Все оптоэлектронные компоненты Sharp предлагаются уже сейчас исключительно в исполнении, соответствующем RoHS, во всем мире бюро продаж Sharp и его дистрибьюторами.

Sharp Microelectronics Europe

Sharp Microelectronics Europe с офисом в Гамбурге является подразделением предприятия Sharp Electronics (Europe) GmbH — дочерней фирмы корпорации Sharp Corporation в Осаке, Япония. Sharp является разработчиком всемирных технологий цифровых ядер, которые играют значительную роль при разработке новейших поколений электронных продуктов для частных пользователей и бизнеса. Sharp Microelectronics Europe предлагает уникальные решения по направлениям памяти, жидкокристаллических индикаторов, оптоэлектронных элементов, CCD, RF/IR, микрокомпьютеров и компонентов System-on-Chip, а также передовые технологии корпусов и интеграционные технологии, которые обеспечивают возможность инженерам-разработчикам в Европе реализовывать их смелые идеи и выводить их на рынок. Sharp Microelectronics Europe поставила своей целью улучшение качества жизни людей за счет внедрения современной технологии и инноваций, высокого качества и повышения уровня проектирования.



НОВЫЕ КНИГИ

Абрамов И. И. Лекции по моделированию элементов интегральных схем. — Москва—Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2005. — 152 с.

В учебном пособии дан единый взгляд на построение моделей элементов кремниевых интегральных схем (ИС) на основе фундаментальной системы уравнений физики полупроводниковых приборов. Приведены классификация моделей и подходы к их синтезу. Описаны основные используемые в настоящее время на практике модели и рассмотрены методы идентификации их параметров. Приведены сведения о программном обеспечении моделирования элементов и фрагментов ИС. Включены примеры двумерного и трехмерного моделирования с использованием численных моделей физических процессов в МОП- и биполярных транзисторах, И²Л-элементах в самых разнообразных режимах их функционирования. Приводятся также результаты анализа элементов в случае учета влияния эффектов сильного легирования, саморазогрева и температуры окружающей среды.

Пособие предназначается для студентов старших курсов соответствующих специальностей, а также может быть полезно аспирантам и инженерам, использующим модели элементов ИС в своих исследованиях.

Дополнительную информацию можно получить на сайте:

<http://www.bsuir.edu.by/nanodev/> и по e-mail: nanodev@bsuir.edu.by

Ильясов Б. Г., Даринцев О. В., Мунасыпов Р. А. Основы микроробототехники: Учебное пособие / Б. Г. Ильясов, О. В. Даринцев, Р. А. Мунасыпов; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т — Уфа: УГАТУ, 2004. — 161 с.

Излагаются основы проектирования и построения микроэлектромеханических систем. Приводятся систематизированные сведения о существующих в настоящее время технологиях изготовления микромеханических систем, классификация существующих микроприводов и микророботов, построенных на их базе. Рассматривается множество конструкций микроэлектромеханических систем и компонентов, анализируется достигнутый уровень разработок, демонстрируется их практическая значимость.

Пособие предназначено для студентов и магистрантов специальностей 210300 "Роботы и робототехнические системы", 071800 "Мехатроника" направления 650200 "Мехатроника и робототехника". Может быть полезно аспирантам и широкому кругу специалистов в области создания средств автоматизации.

CONTENTS

Babayevsky P. G., Zhukov A. A., Shapoval S. Yu., Grinkin E. A. *Adhesion Interaction of Solid Surfaces and Polymer Dry Adhesives Development Theoretical Aspects* 2

Physical and geometrical aspects of adhesion bonds formation between solid surfaces without liquid adhesive, material and micro- or nanodimensional structure of dry adhesives selection criterions, adaptation to surfaces and self-cleaning effect are presented with using ideas of dry adhesion mechanism in nature and theoretical data given in literature.

Landyshev A. V., Lavrentjev A. A., Landyshev V. A. *Research of Influence Concentration Heterogeneity in Alloys $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$ and $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,6}\text{Te}_{2,4}$ on Their Thermoelectric Properties* 8

Influence concentration heterogeneity in alloys $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$ and $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,6}\text{Te}_{2,4}$ on their thermoelectric properties is investigated. Alloys prepared crystallization from melt, pressing of a powder and annealing of briquettes, extrusion and with application of superfat tempering from a liquid condition. Samples were investigated by means of methods of electronic microscopy and electron-probe microanalysis besides measurements of electrophysical parameters was spent: mobility, thermoelectric power, conductivity, concentration of carriers of a current and parameter $\alpha^2\sigma$. Correlation between thermoelectric properties and concentration heterogeneity is established.

Estimations of influence heterogeneity in alloys to thermoelectric properties were made.

Lotonov A. M., Novik V. K., Gavrilova N. D. *On Dielectric Permittivity Dispersion in Ferroelectric Triglycine Sulfate (TGS) in Wide Temperature Range* 14

The results of research of a dielectric dispersion in ferroelectric Triglycine Sulfate (Curie point $T_c = 49,15^\circ\text{C}$) in frequency range $10^{-3} \dots 10^7$ Hz at $-155 \dots 90^\circ\text{C}$ are stated. In paraelectric phase there is no dispersion or it is extremely flat. In close vicinity to the transition region ($T_c + 0,3^\circ\text{C}$) appearance of a dispersion was observed, while the classical form of the latter is formed only at $T = T_c$. The appeared domain structure is considered to be the dominating reason of the dispersion. In high-frequency range its contribution is connected with oscillations of a domain wall, in low-frequency range — also with the formation of new domains, i. e. with reversed polarization processes in small fields. At ultra low frequencies the contribution of the own electric conductivity to the dispersion is noted, that especially increase in paraelectric phase and in the Curie point. At $T = T_c$ at frequencies less than 10^{-1} Hz formation of a closing layer was observed, that lowers measured value of a dielectric permittivity of the sample by two orders of magnitude.

Hurtavy V. G., Sheleg A. U. *Low-Temperature Investigates of the $\text{K}_3\text{Li}_{1,88}\text{Nb}_{5,12}\text{O}_{15,24}$ Crystal Dielectric Properties* 22

The investigations of electrical conductivity (σ) and dielectric properties (ϵ , $\text{tg}\delta$) of $\text{K}_3\text{Li}_{2-x}\text{Nb}_{5+x}\text{O}_{15+2x}$ (KLN) crystal in the temperature range of 100–300 K were carried out. The measurements of σ , ϵ and $\text{tg}\delta$ were carried out at frequencies of 0.1 kHz, 1 kHz, 10 kHz and 1 MHz. It was established that the dielectric constant ϵ increases as the temperature is raised and decreases with the frequency growth. It is shown, that with the frequency growth electrical conductivity increases in several orders. The anisotropy of electrical conductivity and dielectric properties was discovered.

Bobrovnik V. N., Shelepin N. A. *Analysis of Silicic Beam-Type Strain Gauge Intrinsic Frequency and Mechanical Stresses* 25

An opportunity of two programs joint usage for calculation sensor with sensing elements Q-factor is considered in this article. Intrinsic frequencies are determined in COSMOS/DesignSTAR. And distribution diagrams of mechanical stresses are calculated in Mechanical Desktop Power Pack for determination of tensomodels' optimum allocation on the surface of the strain gauge.

Komov A. N., Kurganskaya L. V., Shcherbak A. V. *Fast High Sensivity Microwave Power Meter on SiC/Si Structures* 28

This research dedicates to application of SiC/Si hetero structures for high power microwave measurement. The estimation of influence attendant effects on output signal is carried out. It is shown that such structures may be used for high power microwave measurements.

Fedorov R. A., Shelepin N. A. *Design of the Circuit Supporting Resonant Fluctuations of the Sensitive Element of Micromechanical System* 35

The opportunity of joint modeling of differential capacitor micromechanical system and the electric circuit is considered. Transfer function of system consisting of MEMS and the electric circuit supporting the resonant fluctuations is received, allowing to estimate a degree of influence of the basic parts.

Luchinin V. V., Maltsev P. P. *Of the Term "Microsystems Technologies" of the English-Russian Dictionary* 39

Of the term "microsystems technologies" (MST) и "microelectromechanical systems" (MEMS) of the english-russian dictionary.

Yashin K. D., Lazapnev E. V. *The Terminological English-Russian Mems&Nems Dictionary* 42

In dictionary are given the terms and most widely used phrases and abbreviations of micro- and nanosystems and their fabrication.

For foreign subscribers:

"NANO and MICROSYSTEMS TECHNIQUES" Magazine (*Nano- i mikrosistemnaa tehnika*, ISSN 1684-6419)
Joint-stock company MK-Periodica. E-mail: info@periodicals.ru Tel.: +7(095) 684-5008. Fax: +7(095) 681-3798

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(495) 269-5510.
E-mail: it@novtex.ru; http://www.microsystems.ru

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромьинский пер., 4/1. Телефон редакции журнала (495) 269-5510. E-mail: it@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 И.С. Павлова. Корректор М. Г. Джавадян

Сдано в набор 30.11.2005. Подписано в печать 30.12.2005. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 7,83. Заказ 123. Цена договорная

Отпечатано в Подольской типографии — филиал ОАО "ЧПК", 142110, г. Подольск, ул. Кирова, 15