

# ЭЛЕМЕНТЫ МСТ И МИКРОСИСТЕМЫ

УДК 531.383

**В. А. Коваленко, Ю. А. Яценко,**  
**В. В. Чиковани,** д-р техн. наук,  
**Л. В. Борисюк,** д-р техн. наук,  
 Украинский Технологический центр оптического  
 приборостроения, г. Киев

## ДЕШЕВЫЙ КОРИОЛИСОВЫЙ ВИБРАЦИОННЫЙ ГИРОСКОП ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ МЫШИ

*Показаны зависимость измеряемой угловой скорости от разности фаз сигналов возбуждения и съема и высокая крутизна выходной характеристики при фазовом методе измерения угловой скорости. Обсуждается возможность непосредственной передачи измерительной информации в виде приращения угла за такт съема в компьютер через его последовательный порт, к которому традиционно подключается компьютерная мышь.*

### Введение

Широкое развитие компьютерной техники и ее интенсивное использование в различных областях привело к необходимости развития вспомогательных средств, обеспечивающих удобное и гибкое взаимодействие человека и компьютера. При этом для разработки таких средств привлечены современные технологии практически из всех областей техники. Одной из таких областей, которая способна значительно усовершенствовать существующие средства взаимодействия человека с компьютером, является гироскопия. В частности, современные дешевые малогабаритные и микроминиатюрные гироскопы могут использоваться при создании инерциальной компьютерной мыши — гироскопической системы управления курсором компьютера, а также измерения углов поворота головы для шлема виртуальной реальности. Использование гироскопов увеличит надежность, долговечность, помехозащищенность таких систем, а также расширит возможность их применения в тренажерных системах различного назначения. Например, инерциальная компьютерная мышь может размещаться на столе или может быть закреплена на руке (при отсутствии стола, например, для "lap-top" компьютеров) либо на голове пользователя. Последний вариант размещения дает возможность пользоваться компьютером инвалидам, которые не могут из-за болезни рук выполнить простую операцию: нажать кнопку мыши или в

случаях, когда руки заняты, выполнить другие операции. В этом случае кивок головы заменяет нажатие кнопки мыши.

Наиболее перспективными гироскопами для применения в компьютерной технике, с точки зрения цены и точности, являются кориолисовые вибрационные гироскопы.

В настоящей работе на основе решения (для случая постоянной угловой скорости) уравнения двумерного маятника как кольцевой модели кориолисового вибрационного гироскопа показана зависимость разности фаз сигналов возбуждения и съема от измеряемой угловой скорости. Приводятся графики теоретической и экспериментальной выходных характеристик вибрационного гироскопа, полученные с использованием фазового метода измерения угловой скорости. Показана высокая крутизна выходной характеристики при фазовом методе измерения угловой скорости, а также возможность управления этой крутизной путем изменения электрических параметров. Приводятся результаты испытаний кориолисового вибрационного гироскопа, полученные с металлическим цилиндрическим резонатором и разомкнутой обратной связью для предполагаемого применения в компьютерной мыши. Гироскоп удешевлен благодаря тому, что в нем отсутствует электронный блок удержания волны и упрощена схема обработки информативного сигнала, которая дает возможность непосредственной передачи измерительной информации в виде углового приращения за такт съема в компьютер через его последовательный порт com1 или com2 — порты традиционного подключения компьютерной мыши. Приводятся результаты измерений дрейфа и масштабного коэффициента "фазового гироскопа".

### Зависимость фазы — угловая скорость

Для позиционного возбуждения уравнения двумерного маятника, описывающие кольцевую модель кориолисового вибрационного гироскопа, имеют вид [1]:

$$\begin{aligned} \ddot{x} - 2k\Omega\dot{y} + \frac{2}{\tau}\dot{x} + \omega_0^2x &= \\ &= -F_1 \cos\varphi_{el} \cos\lambda t - F_2 \sin\varphi_{el} \sin\lambda t, \\ \ddot{y} + 2k\Omega\dot{x} + \frac{2}{\tau}\dot{y} + \omega_0^2y &= \\ &= -F_1 \sin\varphi_{el} \cos\lambda t - F_2 \cos\varphi_{el} \sin\lambda t, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\Omega$  — измеряемая угловая скорость;  $k = 0,4$ ;  $x$  — перемещение по координате  $x$  (по линии пучностей);  $y$  — перемещение по координате  $y$  (по линии



узлов);  $\tau$  — время затухания свободных колебаний в  $e$  раз;  $\omega_0$  — собственная частота резонатора по второй моде;  $F_1, \lambda$  — амплитуда и частота нормированной силы возбуждения, действующей по координате  $x$ ;  $F_2$  — амплитуда нормированной силы, действующей по координате  $y$  (корректирующее воздействие);  $\varphi_{el}$  — угловая ширина электрода (рис. 1).

Рис. 1. К кольцевой модели резонатора

Вследствие малого влияния кориолисовых сил в пучностях и стабилизации амплитуды колебаний пренебрегаем вторым слагаемым ( $-2k\Omega\dot{y}$ ) первого уравнения системы (1) и ищем решение в виде:

$$x(t) = A \sin(\lambda t) + B \cos(\lambda t); \quad A, B = \text{const.} \quad (2)$$

Подставляя (2) в первое уравнение системы (1), после преобразований получим:

$$A = \frac{F_2 \sin \varphi_{el} \frac{2\lambda}{\tau} - F_1 \cos \varphi_{el} (\omega_0^2 - \lambda^2)}{(\omega_0^2 - \lambda^2)^2 - \left(\frac{2\lambda}{\tau}\right)^2};$$

$$B = \frac{-F_2 \sin \varphi_{el} (\omega_0^2 - \lambda^2) - F_1 \cos \varphi_{el} \frac{2\lambda}{\tau}}{(\omega_0^2 - \lambda^2)^2 - \left(\frac{2\lambda}{\tau}\right)^2}.$$

Запишем второе уравнение системы (1) в виде:

$$\ddot{y} + \frac{2}{\tau} \dot{y} + \omega_0^2 y = -2k\Omega \dot{x} - F_1 \sin \varphi_{el} \cos \lambda t - F_2 \cos \varphi_{el} \sin \lambda t. \quad (3)$$

Положим, что  $\Omega = \text{const}$  и будем искать решение в виде:

$$y(t) = C \sin(\lambda t) + D \cos(\lambda t); \quad C, D = \text{const.} \quad (4)$$

Подставляя (4) в (3) с учетом (2), получим:

$$C = \frac{(2k\Omega B \lambda - F_2 \cos \varphi_{el})(\omega_0^2 - \lambda^2) - (2k\Omega A \lambda - F_1 \sin \varphi_{el}) \frac{2\lambda}{\tau}}{(\omega_0^2 - \lambda^2)^2 + \left(\frac{2\lambda}{\tau}\right)^2};$$

$$D = \frac{-(2k\Omega A \lambda - F_1 \sin \varphi_{el})(\omega_0^2 - \lambda^2) - (2k\Omega B \lambda - F_2 \cos \varphi_{el}) \frac{2\lambda}{\tau}}{(\omega_0^2 - \lambda^2)^2 + \left(\frac{2\lambda}{\tau}\right)^2}. \quad (5)$$

Колебания резонатора  $w(t, \varphi)$  в точке с угловой координатой  $\varphi$  в момент времени  $t$  для второй моды определяются следующим образом [2]:

$$w(t, \varphi) = x(t) \cos 2\varphi + y(t) \sin 2\varphi. \quad (6)$$

Подставляя в (6)  $x(t)$  и  $y(t)$  получим:

$$w(t, \varphi) = \sqrt{(A \cos 2\varphi + C \sin 2\varphi)^2 + (B \cos 2\varphi + D \sin 2\varphi)^2} \times \sin(\lambda t + \psi_w); \quad (7)$$

$$\psi_w = \arctg \frac{B \cos 2\varphi + D \sin 2\varphi}{A \cos 2\varphi + C \sin 2\varphi}.$$

Зависимость  $\psi_w$  от  $\Omega$  при  $\varphi_{el} = 0,2$  рад,  $\tau = 0,5$  с,  $\Delta\omega = \omega_0 - \lambda = 5$  рад/с,  $\omega_0 = 20000$  рад/с,  $F_1/F_2 = 8$  представлена на рис. 2. Видно, что в диапазоне  $\pm(70-80)^\circ/\text{с}$  выходная характеристика практически линейна и симметрична относительно нуля, что вполне достаточно для многих применений. Крутизна выходной характеристики  $\Delta\psi_w/\Delta\Omega$  составляет примерно  $3^\circ/(\text{с})$  и может регулироваться изменением электрических параметров, например,  $\Delta\omega$  и  $F_1/F_2$ . При этом уменьшение крутизны приводит к увеличению диапазона линейности выходной характеристики.

Для измерения разности фаз два сигнала с узла и пучности подаются на фазовый компаратор, выходные импульсы которого заполняются опорной частотой и фиксируются счетчиком за выбранный такт съема. В результате выходной сигнал "фазового гироскопа" представляется в виде числа импульсов опорной частоты, пропорционального угловому приращению за такт съема. Эта измерительная информация может быть непосредственно передана в компьютер через последовательный порт, к которому традиционно подключается мышь. Кроме того, фазовые измерения обладают более высокой помехоустойчивостью, чем амплитудные.

В применениях, где требуется значительно больший диапазон измерения, необходимо поддемфировать волну введением обратной связи по амплитуде, а показания гироскопа формировать в виде грубого аналогового отсчета (сигнала обратной связи) и точного цифрового отсчета (разности фаз).

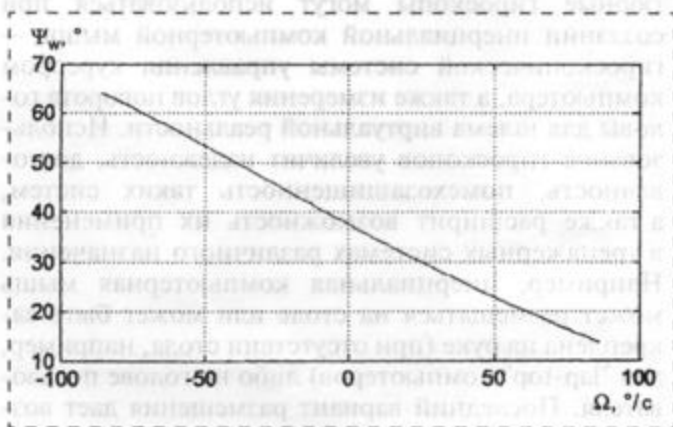


Рис. 2. Зависимость разности фаз сигналов возбуждения и съема от угловой скорости вращения резонатора

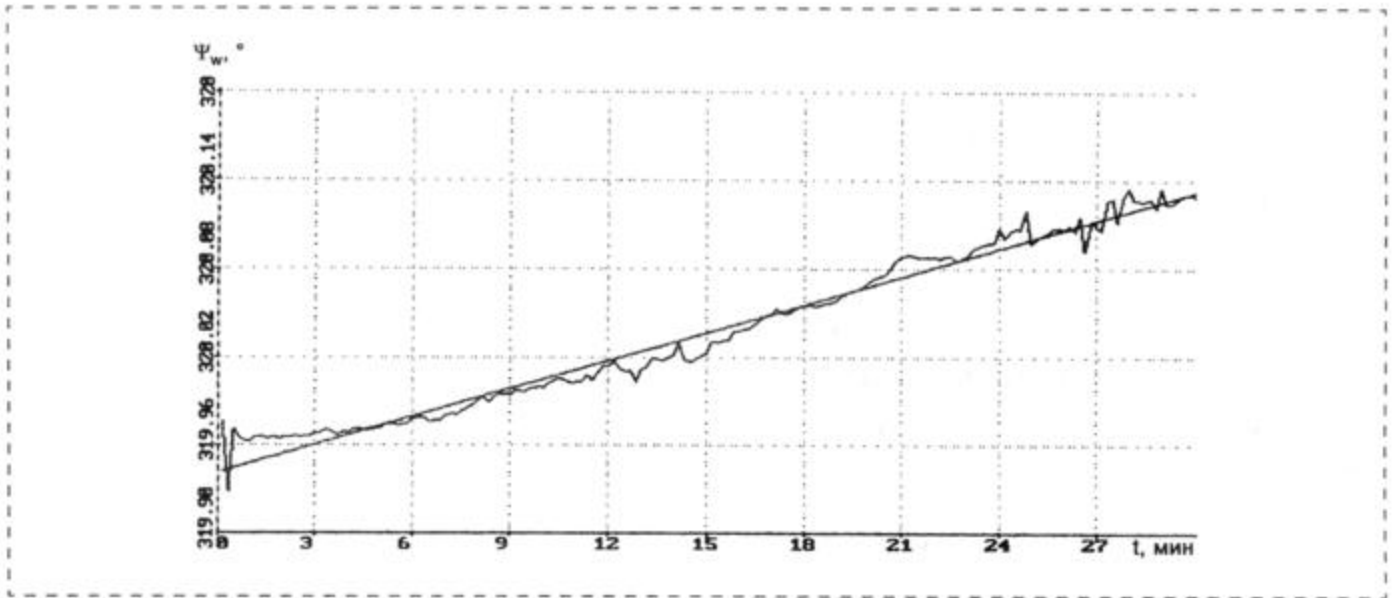


Рис. 3. Дрейф выходного сигнала фазового гироскопа

### Результаты измерений

На рис. 3 представлен получасовой дрейф "фазового гироскопа". Видно, что после 3—4 мин работы дрейф хорошо аппроксимируется линейной функцией. При этом значение ухода выходного сигнала гироскопа равно 0,4°/мин.

На рис. 4 представлены результаты измерения масштабного коэффициента "фазового гироскопа" в виде числа импульсов опорного генератора, накопленных за время поворота гироскопа на угол  $2\pi$ . Вычисляя нормированное значение масштабного коэффициента (МК) по формуле

$$K = (N_{2\pi}^+ T^- - N_{2\pi}^- T^+) / (4\pi T^+ T^-), \quad (8)$$

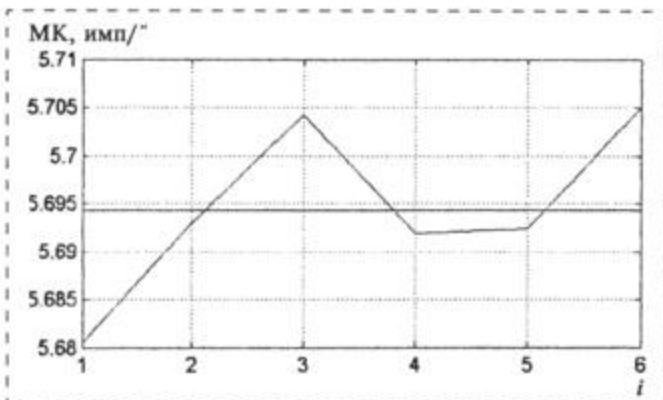


Рис. 4. Масштабный коэффициент фазового гироскопа ( $i$  — номер испытания)

где  $N_{2\pi}^+$ ,  $N_{2\pi}^-$ ,  $T^+$ ,  $T^-$  — число импульсов, накопленное за один оборот, время оборота при вращении по и против часовой стрелки и стандартное отклонение по шести измерениям, получим оценку масштабного коэффициента "фазового гироскопа"  $K = 0,5694 \pm 0,0009127$  имп/°. Таким образом  $\Delta K/K = 0,0009127/0,5694 = 1,6 \cdot 10^{-3}$ .

### Заключение

Метод фазовых измерений позволяет упростить и удешевить проблему интегрирования угловой скорости за такт съема и передачи измеренного гироскопом углового приращения в компьютер, что дает возможность надеяться на сравнительно низкую цену инерциальной компьютерной мыши, имеющей широкий круг коммерческих применений. Кроме того, реализация совместного амплитудного и фазового методов измерения угловой скорости в виде грубого и точного отчетов может существенно расширить спектр применений гироскопов с металлическим резонатором.

### Список литературы

1. Lynch D. D. Vibratory Gyro Analysis by the Method of Averaging // 2-nd S. Petersburg Int. Conf. on Gyroscopic Technology and Navigation: Part I/ V. G. Peshekhonov Editor. May 24—25. 1995. P. 26—34.
2. Матвеев В. А., Липатников В. И., Алехин А. В. Проектирование волнового твердотельного гироскопа. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998. 167 с.

**Н. А. Щербаков, А. Н. Еременко,**  
**Е. С. Горнев,** д-р техн. наук,  
**Н. А. Зайцев,** д-р техн. наук, **М. Ф. Равилов,**  
**С. О. Ранчин, И. М. Романов,** канд. техн. наук,  
 АОТ "НИИМЭ И МИКРОН"  
**А. Н. Зайцев, В. Ю. Кочетков,** канд. техн. наук,  
**Ю. В. Савченко,** д-р техн. наук, МГИЭТ (ТУ)

## ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

*Показано, что в результате проведенных исследований, был разработан базовый технологический маршрут, позволяющий в условиях микроэлектронного производства изготавливать широкий класс микроэлектромеханических устройств. Так, в условиях производства кристаллов впервые в России было разработано и изготовлено устройство специального назначения — микрозеркало — по технологии поверхностной микромеханики.*

В настоящее время во всем мире проводятся исследования с целью разработки изделий микросистемной техники различного функционального назначения [1]. Перспективность данного направления в первую очередь связана с тем, что появилась возможность реализовать на одном чипе исполнительный механизм и схему его управления [2]. Кроме того, широкий класс данных устройств можно в принципе реализовать в условиях микроэлектронного производства с топологическими размерами 1,2...1,5 мкм. Возможность реализации данного подхода особенно важна и перспективна для России, так как используемое в настоящее время физико-технологическое оборудование позволяет изготавливать чипы именно с такими минимальными размерами. Перед нами стояла задача разработать базовый технологический маршрут, с помощью которого можно было бы реализовать как можно более широкий класс изделий микросистемной техники, но при этом он должен быть выполнен на конкретном, работающем в цехе наборе физико-технологического оборудования, используемого в реальном производстве кремниевых чипов. Совершенно очевидно, что при этом большинство технологических операций микроэлектронного производства должно быть адаптировано под конструкцию и технологию микросистемного устройства. Также понятно, что в этом случае необходимо использовать технологию поверхностной микромеханики [3]. В основе этой технологии лежат два основных микроцикла:

- формирование жертвенных слоев, которые в последствии удаляются;

- формирование технологических (рабочих) слоев.

В качестве жертвенных слоев используются пленки фосфоро-силикатного стекла, диоксида кремния, а также их комбинации. Слои поликристаллического кремния ( $Si_{п.к}$ ) различной толщины (обычно 1 мкм и более), металлические пленки (алюминия, золота и другие) выполняют роль рабочих слоев в структуре микросистемного устройства.

Для разработки технологического маршрута изготовления микрозеркала за основу была взята технология с двумя рабочими слоями поликристаллического кремния и дополнительным (нулевым) слоем, используемым в качестве электрической разводки.

На рис. 1 (см. вторую сторону обложки) представлен технологический маршрут изготовления и типовая структура микроэлектромеханической системы (МЭМС), которая состоит из: кремниевой подложки; рабочих слоев поликристаллического кремния, слоя поликристаллического кремния в качестве электрической разводки, продублированных, где возможно, металлом; слоев фосфоро-силикатного стекла (ФСС), как жертвенных слоев; термического оксида кремния и нитрида кремния в качестве изоляционных и защитных слоев. Формирование структуры происходит согласно маршруту, представленному на рис. 1. Безусловно, совокупность данных технологических операций, используемых в технологии поверхностной микромеханики, требует исследования и отработки как процессов осаждения, так и локального избирательного травления. В качестве демонстрации возможностей технологического маршрута нами был разработан тестовый кристалл [3]. В состав кристалла входило микрозеркало, а также с целью оптимизации этого устройства отдельные его элементы, например, актюатор (электростатический микропривод), микропетли и другие.

В технологическом маршруте изготовления микрозеркала требуется осаждение толстых слоев нитрида кремния и поликристаллического кремния. На существующем оборудовании получение качественных технологических слоев было проблематично, поэтому использовалось послойное осаждение. Так, слои нитрида кремния толщиной 0,36 мкм и поликристаллического кремния толщиной 1,5 мкм осаждали в три этапа с промежуточной химической обработкой поверхности предыдущих технологических слоев.

По сложности поведения микромеханические устройства не уступают полупроводниковым приборам, а нередко являются более сложными и менее изученными. Поэтому без использования компьютерного моделирования достаточно не просто, а также и дорого разрабатывать и изготавливать качественные микромеханические устройства. С помощью моделирования была определена структура устройства, а также проверена правильность выбо-

ра топологических, конструктивных и технологических параметров. На основании двумерного моделирования было исследовано распределение нормальной компоненты механических напряжений в структуре микрзеркала. Были определены оптимальные толщины технологических слоев, а также режимы их получения.

В итоге было разработано и изготовлено в условиях микроэлектронного производства микрзеркало. На рис. 2 (см. третью сторону обложки) в плоскости подложки в общем виде представлено микрзеркало, где 1 — рама; 2 — торсионы, служащие для крепления; 3 — микрзеркала; 4 — управляющий электрод, необходимый для отклонения микрзеркала; 5 — микропетли; 6 — гибкий и 7 — жесткий фиксаторы, удерживающие микрзеркало в вертикальном положении; 8 — актюатор (электростатический привод), осуществляющий сборку всего устройства; 9 — гибкий луч.

На рис. 3, 4, 5 (см. третью сторону обложки) представлены микрзеркало 1 в раме и управляющий электрод 2. Устройство находится в вертикальном положении по отношению к подложке.

При подаче на управляющий электрод напряжения переключения микрзеркало поворачивается на определенный (заданный) угол, осуществляя передачу сигнала (например, светового) из одного канала в другой. После выключения напряжения микрзеркало возвращается в исходное положение за счет упругости торсионов.

Разработанная базовая технология позволяет изготавливать широкий класс устройств микросистемной техники, которые непосредственно можно реализовать на предприятиях электронной промышленности.

#### Список литературы

1. Климов Д. М., Васильев А. А., Лучинин В. В., Мальцев П. П. Перспективы развития микросистемной техники в XXI веке // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 3—6.
2. Мальцев П. П., Телец В. А., Никифоров А. Ю. Интегрированные технологии микросистемной техники // Микросистемная техника. 2001. № 11. С. 22—25.
3. Зайцев Н. А., Равилов М. Ф., Ранчин С. О. Исследование и разработка технологии изготовления устройств микросистемной техники в условиях микроэлектронного производства // Труды Всероссийской научно-технической конференции "Микро- и нанoeлектроника-2001". Звенигород. С. 3—39.

## Применение МСТ

УДК 615.478

П. В. Иванов, Е. И. Ситало, канд. техн. наук,  
Е. С. Цихоцкий, канд. техн. наук,  
НИИ физики Ростовского государственного университета

### СКАНИРОВАНИЕ И ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ В ЛИТОТРИПТЕРЕ ЛУ-1

*Рассмотрен литотриптер ЛУ-1, предназначенный для экстракорпорального разрушения почечных конкрементов (камней) размером от 6 мм и более в условиях стационаров.*

Разрушение конкрементов происходит под воздействием сконцентрированного в пространстве пучка ультразвуковых волн определенного частотного диапазона. Высокая пространственная концентрация ультразвуковой ударной волны достигается применением многоэлементного пьезо-

электрического осесимметричного кольцевого фокусирующего излучателя ультразвуковых волн — силовой антенной решетки. Литотрипсия и наведение фокуса силовой антенной решетки на почечный камень осуществляются под контролем ультразвукового визуализатора, одной из важ-

нейших систем которого является система сканирования и позиционирования.

#### Назначение

Система сканирования и позиционирования предназначена для:

- углового перемещения ультразвукового излучателя внешнего сканера визуализатора в заданных пределах с определенной точностью;
- измерения угла смещения ультразвукового излучателя внешнего сканера визуализатора;
- измерения пространственных координат ультразвукового излучателя внешнего сканера визуализатора в заданных пределах с определенной точностью;
- углового перемещения ультразвукового излучателя центрального сканера визуализатора в

ра топологических, конструктивных и технологических параметров. На основании двумерного моделирования было исследовано распределение нормальной компоненты механических напряжений в структуре микрзеркала. Были определены оптимальные толщины технологических слоев, а также режимы их получения.

В итоге было разработано и изготовлено в условиях микроэлектронного производства микрзеркало. На рис. 2 (см. третью сторону обложки) в плоскости подложки в общем виде представлено микрзеркало, где 1 — рама; 2 — торсионы, служащие для крепления; 3 — микрзеркала; 4 — управляющий электрод, необходимый для отклонения микрзеркала; 5 — микропетли; 6 — гибкий и 7 — жесткий фиксаторы, удерживающие микрзеркало в вертикальном положении; 8 — актюатор (электростатический привод), осуществляющий сборку всего устройства; 9 — гибкий луч.

На рис. 3, 4, 5 (см. третью сторону обложки) представлены микрзеркало 1 в раме и управляющий электрод 2. Устройство находится в вертикальном положении по отношению к подложке.

При подаче на управляющий электрод напряжения переключения микрзеркало поворачивается на определенный (заданный) угол, осуществляя передачу сигнала (например, светового) из одного канала в другой. После выключения напряжения микрзеркало возвращается в исходное положение за счет упругости торсионов.

Разработанная базовая технология позволяет изготавливать широкий класс устройств микросистемной техники, которые непосредственно можно реализовать на предприятиях электронной промышленности.

#### Список литературы

1. Климов Д. М., Васильев А. А., Лучинин В. В., Мальцев П. П. Перспективы развития микросистемной техники в XXI веке // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 3—6.
2. Мальцев П. П., Телец В. А., Никифоров А. Ю. Интегрированные технологии микросистемной техники // Микросистемная техника. 2001. № 11. С. 22—25.
3. Зайцев Н. А., Равилов М. Ф., Ранчин С. О. Исследование и разработка технологии изготовления устройств микросистемной техники в условиях микроэлектронного производства // Труды Всероссийской научно-технической конференции "Микро- и нанoeлектроника-2001". Звенигород. С. 3—39.

## Применение МСТ

УДК 615.478

П. В. Иванов, Е. И. Ситало, канд. техн. наук,  
Е. С. Цихоцкий, канд. техн. наук,  
НИИ физики Ростовского государственного университета

### СКАНИРОВАНИЕ И ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ В ЛИТОТРИПТЕРЕ ЛУ-1

*Рассмотрен литотриптер ЛУ-1, предназначенный для экстракорпорального разрушения почечных конкрементов (камней) размером от 6 мм и более в условиях стационаров.*

Разрушение конкрементов происходит под воздействием сконцентрированного в пространстве пучка ультразвуковых волн определенного частотного диапазона. Высокая пространственная концентрация ультразвуковой ударной волны достигается применением многоэлементного пьезо-

электрического осесимметричного кольцевого фокусирующего излучателя ультразвуковых волн — силовой антенной решетки. Литотрипсия и наведение фокуса силовой антенной решетки на почечный камень осуществляются под контролем ультразвукового визуализатора, одной из важ-

нейших систем которого является система сканирования и позиционирования.

#### Назначение

Система сканирования и позиционирования предназначена для:

- углового перемещения ультразвукового излучателя внешнего сканера визуализатора в заданных пределах с определенной точностью;
- измерения угла смещения ультразвукового излучателя внешнего сканера визуализатора;
- измерения пространственных координат ультразвукового излучателя внешнего сканера визуализатора в заданных пределах с определенной точностью;
- углового перемещения ультразвукового излучателя центрального сканера визуализатора в

заданных пределах с определенной точностью;

- измерения угла смещения ультразвукового излучателя центрального сканера визуализатора;
- поворота плоскости сканирования излучателя центрального сканера визуализатора вокруг оси симметрии силовой антенной решетки и измерения угла поворота с определенной точностью.

### Состав

В состав системы сканирования и позиционирования входят:

- внешний сканер;
- устройство позиционирования внешнего сканера;
- центральный сканер;
- устройство позиционирования центрального сканера.

### Внешний сканер

В качестве внешнего сканера применен сканер механический, секторный. Сканер представляет собой компактное малогабаритное устройство, предназначенное для излучения и приема ультразвуковой энергии.

Для обеспечения сканирования излучателя на  $\pm 30$  или  $\pm 45^\circ$  предусмотрен механизм, преобразующий вращение входного вала в качание излучающего элемента. Механизм размещен в головке сканера, входной вал его герметизирован резиновым уплотнением и сочленен с приводом через шлицевую муфту, позволяющую компенсировать некоторую несоосность вала привода механизма сканирования и выходного вала редуктора.

Приводом устройства сканирования служит электродвигатель постоянного тока, питаемый безопасным для оператора и пациента напряжением (6–12 В). Так как двигатель имеет достаточно высокую скорость вращения выходного вала, а для нормального сканирования излучателя необходима более низкая скорость, то между этими частями устройства размещен редук-

тор, согласующий скорости вращения вала привода механизма сканирования и вала двигателя.

Редуктор выполнен в виде двухступенчатой прямозубой передачи с общим передаточным отношением 8. Дополнительно (кроме зубчатой передачи) в корпусе редуктора размещены два инфракрасных фотодиода системы съема угловых координат излучателя.

Ультразвуковой излучатель находится в герметичной, заполненной звукопроводящей жидкостью головке сканера. Колпачок головки выполнен из материала, слабо поглощающего ультразвук. Кроме функции герметизации объема головки колпачок дополнительно обеспечивает механическую защиту излучателя от внешних механических воздействий и качественный акустический контакт с телом пациента. Ввод и вывод электрических сигналов излучателя обеспечивается наличием в головке герметизированных проходных контактов, изолированных от корпуса устройства.

Головка, редуктор и двигатель объединены в одно целое с помощью двух корпусов, которые определяют взаимное положение этих устройств и кроме этого служат для размещения двух инфракрасных светодиодов системы съема угловых координат излучателя.

На входном и выходном валах редуктора установлены диски с расположенными по окружности окнами. Вращаясь между соосно расположенными парами света и фотодиодов, диски, за счет наличия в них окон, механическим путем модулируют поток инфракрасного излучения. Этот модулированный сигнал в дальнейшем используется для определения угловых координат излучателя.

Дополнительно к этим основным узлам сканера в корпусе размещены две платы, содержащие электронную схему фильтрации напряжения питания электродвигателя и усиления сигнала фотодатчиков. Платы выполнены методом печатного монтажа и за-

креплены на корпусе двумя кронштейнами. Провода объемного монтажа объединяются в общий жгут и через отверстие в задней стенке корпуса выводятся во внешний объем.

Конструктивно сканер размещен в разъемном пластмассовом корпусе, обеспечивающем удобство размещения в руке оператора во время работы.

Материалы корпуса сканера нетоксичны и позволяют проводить дезинфицирование внешней поверхности холодным способом по ОСТ 42-21-1-85.

Массогабаритные характеристики сканера превосходят известные отечественные аналоги.

### Устройство позиционирования внешнего сканера

Это устройство предназначено для измерения пространственных координат излучателя внешнего сканера в заданных пределах с определенной точностью.

**Кинематическая схема.** Устройство позиционирования состоит из четырех звеньев и сканера. Звенья соединены между собой с помощью шарнирного устройства, являющегося одновременно механизмом отсчета (рис. 1).

Звено 1 неподвижно. Звенья 2 и 3 обеспечивают перемещение и вращение сканера в вертикальной плоскости, звено 4 позволяет вращать сканер вокруг оси, пер-

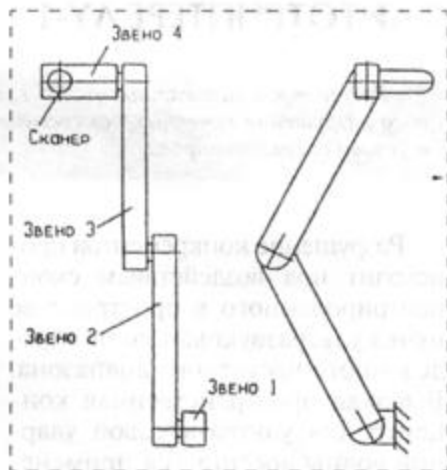


Рис. 1

пендикулярной указанной плоскости. Укрепленное в звене 4 отсчетное устройство соединено с помощью втулки-корпуса со сканером, что дает возможность вращать последний вокруг своей оси.

Сигналы, численно равные углу поворота звена, усиливаются с помощью схемы, размещенной на плате внутри корпуса звена. Монтажные провода проходят внутри корпуса звеньев к неподвижному звену I.

**Отсчетное устройство.** Отсчетное устройство должно обеспечить требуемую точность отсчета угла поворота звена. Оно состоит из трех пар зубчатой передачи  $Z_6$  и  $Z_5$ ,  $Z_4$  и  $Z_3$ ,  $Z_2$  и  $Z_1$ , расположенных в едином корпусе на осях (рис. 2):

- на оси I —  $Z_1$ ;
- на оси II —  $Z_2$  и  $Z_3$ ;
- на оси III —  $Z_4$  и  $Z_5$ ;
- на оси IV —  $Z_6$ .

Ось IV является опорной осью звена. На оси I размещен диск  $D$  с окнами, расположенными по окружности. Диск разделяет две соосно расположенные пары светодиод — фотодиод, вырабатывающие сигналы при вращении диска, число которых определяет угол поворота звена. Пары светодиод — фотодиод расположены по углу с шагом, не кратным шагу окон на диске, что дает возможность определить направление вращения звена.

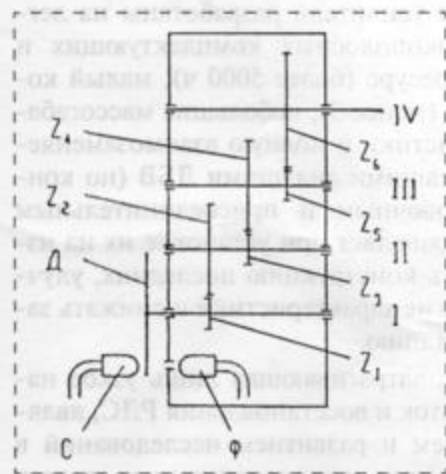


Рис. 2

Передаточное отношение отсчетного устройства равно 180 и распределено следующим образом:

$$\frac{Z_6}{Z_5} = 6; \quad \frac{Z_4}{Z_3} = 6; \quad \frac{Z_2}{Z_1} = 5.$$

$$\text{При } Z_1 = Z_3 = Z_5 = 12$$

$$Z_6 = 72; \quad Z_4 = 72, \quad Z_2 = 60.$$

На диске  $D$  равномерно расположено 64 окна на диаметре 26 мм. Наружный диаметр диска 28 мм.

Модуль зубчатых колес  $Z_6$  и  $Z_5$  — 0,5 мм;  $Z_4, Z_3, Z_2, Z_1$  — 0,3 мм.

Габаритные размеры отсчетного устройства: 82 × 44 × 50 мм (размер 50 мм включает подшипниковые опоры оси IV).

Проведенный расчет погрешности механизма отсчетного устройства позволяет сделать следующие выводы:

- трехступенчатый механизм отсчетного устройства с коэффициентом передачи 180 обеспечивает точность отсчета  $\pm 0,002$  рад. или  $\pm 1$  мм на плече 0,5 м;
- наибольшую погрешность вносит кинематическая точность передачи, поэтому зубчатые колеса  $Z_6$  и  $Z_5$  должны быть изготовлены по третьей степени точности и быть безлюфтовыми;
- достаточно иметь шарикоподшипники пятого класса точности.

### Центральный сканер и устройство его позиционирования

Центральный сканер и устройство его позиционирования выполнены в виде единой сборочной единицы, устанавливаемой в отверстие в днище зеркала силовой антенной решетки через герметизирующую прокладку.

Сканер имеет возможность регулировки угла наклона по отношению к оси симметрии силовой антенной решетки в пределах  $\pm 2^\circ$  с точностью 0,2°.

Сканер обеспечивает возвратно-качательное движение излучателя ультразвуковых колебаний в иммерсионной среде с час-

тотой 3—12 Гц в пределах рабочего сектора  $\pm 12^\circ$  и обеспечивает определение положения излучателя в процессе его движения в пределах рабочего сектора с точностью  $\pm 0,05^\circ$ .

Конструкция крепления датчика угла обеспечивает возможность юстировки начального углового положения датчика угла смещения пьезопреобразователя в пределах  $\pm 5^\circ$ .

Начальное положение сканера и угол наклона излучателя регулируются на работающем литотрипере.

Устройство позиционирования центрального сканера предназначено для поворота плоскости сканирования центрального сканера вокруг оси симметрии силовой антенной решетки и измерения угла этого поворота.

Поворот плоскости сканирования достигается поворотом центрального сканера вокруг его продольной оси. Позиционирование осуществляется электромеханическим устройством поворота и обеспечивает поворот плоскости сканирования вокруг оси симметрии силовой антенной решетки на  $180^\circ$  со скоростью до  $10^\circ/\text{с}$  и измерение положения с точностью  $1^\circ$ . Измеритель угла поворота аналогичен примененному в устройстве позиционирования внешнего сканера.

В состав центрального сканера входят:

- ультразвуковой излучатель;
- механизм сканирования;
- редукторы;
- двигатели.

Излучатель выполнен аналогично излучателю внешнего сканера, имеет аналогичный ему редуктор и двухвальный двигатель. Ввиду того, что излучатель размещен непосредственно в рабочей жидкости, которой заполнена силовая антенная решетка, для изготовления деталей механизма применены материалы и покрытия, стойкие в иммерсионной жидкости, заполняющей рабочий объем силовой антенной решетки. Для предотвращения проникнове-



ния иммерсионной жидкости в зону размещения редукторов, двигателей и элементов электрической схемы применены резиновые кольцевые защитные уплотнения.

Угол сканирования излучателя ( $\pm 12$  или  $\pm 30^\circ$ ) обеспечивается механизмом, который преобразует вращение входного вала в колебательные движения излучателя. Определение угла поворота механизма качания излучателя осуществляется датчиком 2,5 БВТ. Датчик присоединен ко второму валу двигателя через редуктор, идентичный редуктору привода механизма качания излучателя для обеспечения равенства углов поворота.

Система позиционирования (поворота) сканера вокруг своей

продольной оси на  $\pm 90^\circ$  состоит из поводкового устройства, редуктора и двигателя. Выход угла поворота сканера за пределы  $\pm 90^\circ$  исключается конечными выключателями. Опоры вращения выполнены на шарикоподшипниках, которые обеспечивают необходимые требования по радиальным биениям устройства во время работы.

Для согласования скорости поворота корпуса и скорости вращения вала электродвигателя между ними размещен редуктор с передаточным числом 3125. Поводковая муфта позволяет механически разъединить устройство привода и поворотную часть механизма для вывода жгута управления из визуализатора и выборки люфтов. Уплотнение поворот-

ной части визуализатора выполняется резиновым кольцом.

Монтаж центрального сканера с системой позиционирования в силовой антенной решетке осуществляется за фланцем. Для юстировки положения оси сканера на фланце размещено устройство, позволяющее смещать ось сканера на угол  $\pm 2^\circ$  в двух взаимно перпендикулярных плоскостях с последующей фиксацией в выбранном положении. Герметичность обеспечивается резиновыми уплотняющими прокладками. Провода питания, управления, сигнальные цепи выведены во внешний объем через отверстие во фланце. Фланец крепится к отверстию в днище зеркала силовой антенной решетки на винтах.

УДК 621.396.9

С. Ю. Белов,  
АО "ВымпелКом"

## АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНОСТИ И РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ РАБОТ ПО ЗАМЕНЕ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ НА ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

*Рассмотрены вопросы доработки радиолокационных станций в части замены ламп бегущей волны на твердотельные малошумящие СВЧ усилители*

### Введение

Одной из приоритетных задач настоящего времени, учитывая сложившееся (в результате многолетнего недофинансирования) критическое техническое состояние парка радиоэлектронной техники, является проведение частичной модернизации радиолокационных средств (РЛС). Предполагается заменить устаревшие и выработавшие свой ресурс составные части радиоэлектронной техники на их функциональные аналоги, выполненные на новой элементной базе, в целях продления ресурса (срока службы) образцов техники с минимальными затратами.

Для решения указанных проблем был разработан перечень первоочередных работ по модерниза-

ции техники требуемой номенклатуры, где одним из основных вопросов была выделена проблема поддержания работоспособности приемных систем выслуживших гарантийные срок РЛС, сложившаяся ввиду выработки ресурса и морального старения ламп бегущей волны (ЛБВ) малой мощности.

В качестве реализации этого направления поддержания и повышения готовности радиоэлектронной техники и были разработаны малошумящие твердотельные СВЧ усилители (блоки серии 394УВ), производство которых уже начинает осваиваться на ряде предприятий промышленности.

Малошумящие усилители разработаны на легкосъемных широкополосных комплектующих и имеют большой ресурс (более 5000 ч), малый коэффициент шума (менее 3), небольшие массогабаритные характеристики и полную взаимозаменяемость с их устаревшими аналогами ЛБВ (по конструкции, установочным и присоединительным размерам). Это позволяет при установке их на изделия не изменять конструкцию последних, улучшать их технические характеристики и снижать затраты на эксплуатацию.

Данная статья, затрагивающая лишь узкое направление доработок и восстановления РЛС, является продолжением и развитием исследований в области модернизации радиолокационных средств и направлена на поддержание и совершенствова-

ния иммерсионной жидкости в зону размещения редукторов, двигателей и элементов электрической схемы применены резиновые кольцевые защитные уплотнения.

Угол сканирования излучателя ( $\pm 12$  или  $\pm 30^\circ$ ) обеспечивается механизмом, который преобразует вращение входного вала в колебательные движения излучателя. Определение угла поворота механизма качания излучателя осуществляется датчиком 2,5 БВТ. Датчик присоединен ко второму валу двигателя через редуктор, идентичный редуктору привода механизма качания излучателя для обеспечения равенства углов поворота.

Система позиционирования (поворота) сканера вокруг своей

продольной оси на  $\pm 90^\circ$  состоит из поводкового устройства, редуктора и двигателя. Выход угла поворота сканера за пределы  $\pm 90^\circ$  исключается конечными выключателями. Опоры вращения выполнены на шарикоподшипниках, которые обеспечивают необходимые требования по радиальным биениям устройства во время работы.

Для согласования скорости поворота корпуса и скорости вращения вала электродвигателя между ними размещен редуктор с передаточным числом 3125. Поводковая муфта позволяет механически разъединить устройство привода и поворотную часть механизма для вывода жгута управления из визуализатора и выборки люфтов. Уплотнение поворот-

ной части визуализатора выполняется резиновым кольцом.

Монтаж центрального сканера с системой позиционирования в силовой антенной решетке осуществляется за фланцем. Для юстировки положения оси сканера на фланце размещено устройство, позволяющее смещать ось сканера на угол  $\pm 2^\circ$  в двух взаимно перпендикулярных плоскостях с последующей фиксацией в выбранном положении. Герметичность обеспечивается резиновыми уплотняющими прокладками. Провода питания, управления, сигнальные цепи выведены во внешний объем через отверстие во фланце. Фланец крепится к отверстию в днище зеркала силовой антенной решетки на винтах.

УДК 621.396.9

С. Ю. Белов,  
АО "ВымпелКом"

## АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНОСТИ И РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ РАБОТ ПО ЗАМЕНЕ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ НА ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

*Рассмотрены вопросы доработки радиолокационных станций в части замены ламп бегущей волны на твердотельные малошумящие СВЧ усилители*

### Введение

Одной из приоритетных задач настоящего времени, учитывая сложившееся (в результате многолетнего недофинансирования) критическое техническое состояние парка радиоэлектронной техники, является проведение частичной модернизации радиолокационных средств (РЛС). Предполагается заменить устаревшие и выработавшие свой ресурс составные части радиоэлектронной техники на их функциональные аналоги, выполненные на новой элементной базе, в целях продления ресурса (срока службы) образцов техники с минимальными затратами.

Для решения указанных проблем был разработан перечень первоочередных работ по модерниза-

ции техники требуемой номенклатуры, где одним из основных вопросов была выделена проблема поддержания работоспособности приемных систем выслуживших гарантийные срок РЛС, сложившаяся ввиду выработки ресурса и морального старения ламп бегущей волны (ЛБВ) малой мощности.

В качестве реализации этого направления поддержания и повышения готовности радиоэлектронной техники и были разработаны малошумящие твердотельные СВЧ усилители (блоки серии 394УВ), производство которых уже начинает осваиваться на ряде предприятий промышленности.

Малошумящие усилители разработаны на легкоъемных широкополосных комплектующих и имеют большой ресурс (более 5000 ч), малый коэффициент шума (менее 3), небольшие массогабаритные характеристики и полную взаимозаменяемость с их устаревшими аналогами ЛБВ (по конструкции, установочным и присоединительным размерам). Это позволяет при установке их на изделия не изменять конструкцию последних, улучшать их технические характеристики и снижать затраты на эксплуатацию.

Данная статья, затрагивающая лишь узкое направление доработок и восстановления РЛС, является продолжением и развитием исследований в области модернизации радиолокационных средств и направлена на поддержание и совершенствова-

ние безопасности полетов самолетов гражданской авиации.

### Обоснование целесообразности разработки и использования перспективных многофункциональных модулей и комплексированных изделий на твердотельных СВЧ приборах

Чувствительность современной радиолокационной аппаратуры определяется в основном входными устройствами приемника, его входным усилителем. К входным усилителям приемников требования становятся все жестче. Кроме малых собственных шумов усилитель должен обладать большим динамическим диапазоном и малыми интермодуляционными искажениями.

ЛБВ являются электровакуумными усилителями и, несмотря на то, что имеют наиболее широкую полосу пропускания (по сравнению с аналогичными существующими СВЧ усилителями), характеризуются большим коэффициентом шума, значительными габаритными размерами и массой, требуют мощного источника питания, имеют высокую стоимость.

Успехи же, достигнутые в области конструирования и технологии изготовления СВЧ интегральных микросхем, в настоящее время позволяют с помощью полосковых линий создавать аналоги волноводных элементов при значительном снижении габаритных размеров и массы устройств и одновременном увеличении надежности.

Обоснование целесообразности использования блоков 394УВ в приемных трактах средств радиолокации (СРЛ) вместо ЛБВ проведено на примере изделий 1РЛ139, составляющих значительную часть парка СРЛ в гражданской авиации.

Усилитель высокой частоты (УВЧ) приемного тракта обеспечивает предварительную частотную избирательность и предварительное усиление по напряжению, оказывая основное влияние на коэффициент шума  $K_{ш}$  приемного устройства. Известно, что каскад УВЧ, являясь первым каскадом в приемном тракте, вносит наибольший вклад в  $K_{ш}$  приемного устройства, поэтому примем справедливое допущение:

$$K_{ш.пр} = K_{ш.УВЧ}.$$

Тогда чувствительность приемного устройства можно записать в виде

$$P_{пр.мин} = kT_0 FK_{ш.пр},$$

где  $F$  — полоса пропускания приемного устройства;  $T_0$  — температура Кельвина;  $k$  — постоянная Больцмана.

Известно, что дальность действия лоатора  $D_{max}$  и чувствительность приемника, а значит  $F$  и  $K_{ш}$ , находятся в обратной зависимости в четвертой степени. Тогда для расчета дальности действия с замененным УВЧ справедливо соотношение

$$D_{max з} = D_{max} \sqrt[4]{\frac{FK_{ш}}{F_3 K_{ш.з}}}.$$

Если подставить значения полос пропускания и коэффициентов шума ЛБВ УВ-74Ж и блока 394УВ01М, то получим

$$D_{max з} = 1,12 D_{max},$$

т. е. замена традиционного УВЧ в изделии 1РЛ139 на блок 394УВ01М повышает дальность действия лоатора на 12 %.

Аналогичные расчеты с использованием известных соотношений потенциальной точности измерения координат цели при замене УВЧ позволили сделать вывод об уменьшении ошибок измерения на 21 %.

Технико-экономическое обоснование целесообразности замены ЛБВ на блоки 394УВ на примере изделия 1РЛ139 проведено с применением научно-методического аппарата, позволяющего сделать выводы о целесообразности модернизации (проведения доработок) по каждой составной части изделия в отдельности.

В качестве основного показателя в научно-методическом аппарате используется стоимость применения СРЛ по назначению в единицу времени:

$$C_{п} = (C_0 + C_з + C_{инж})/R, \quad (1.1)$$

где  $C_0$ ,  $C_з$  и  $C_{инж}$  — соответственно затраты на оснащение техникой, на эксплуатацию в течение срока службы и на строительство и инженерное оборудование позиций;  $R$  — прогнозируемая долговечность СРЛ.

Критерием целесообразности проведения доработок (замены составных частей образцов СРЛ) является снижение затрат на применение СРЛ по назначению в единицу времени ( $C_{п}$ ) относительно аналогичных затрат для немодернизируемого СРЛ ( $C_{п0}$ ):

$$K_c = C_{п0}/C_{п} > 1, \quad (1.2)$$

где  $K_c$  — коэффициент снижения затрат.

Затраты на оснащение техникой ( $C_0$ ) в выражении (1.1) определяются стоимостью серийного производства СРЛ, рассчитываемой по прейскурантам и методикам соответствующих заказчиков.

Полные затраты на эксплуатацию СРЛ в течение срока службы ( $C_з$ ) составляют прямые затраты, относящиеся непосредственно к образцу ( $C_{пр}$ ), и косвенные затраты ( $C_к$ ) на содержание персона-

ла управления, подразделений обеспечения в расчете на одно изделие:

$$C_{\Sigma} = C_{\text{пр}} + C_{\text{к}}. \quad (1.3)$$

Прямые затраты зависят от расходов на оплату услуг промышленности ( $C_{\text{у.п}}$ ), на закупку ЗИП ( $C_{\text{зип}}$ ), на капитальный ремонт ( $C_{\text{к.р}}$ ), на войсковой (текущий) ремонт ( $C_{\text{в.р}}$ ), на электроэнергию, потребляемую образцом РЭТ ( $C_{\text{ээ}}$ ) (или стоимость горюче-смазочных материалов  $C_{\text{гсм}}$ ), на содержание личного состава, обслуживающего образец ( $C_{\text{л.с}}$ ), и транспортные расходы ( $C_{\text{тр}}$ ):

$$C_{\text{пр}} = f(C_{\text{у.п}}, C_{\text{зип}}, C_{\text{к.р}}, C_{\text{в.р}}, C_{\text{ээ}}, C_{\text{л.с}}, C_{\text{тр}}). \quad (1.4)$$

Косвенные затраты на эксплуатацию СРЛ связаны с прямыми затратами через нормативный показатель  $K$ :

$$C_{\text{к}} = KC_{\text{пр}}. \quad (1.5)$$

С учетом изложенного выражение (1.1) преобразуется к виду

$$C_{\text{п}} = (C_0 + (1 + K)f(C_{\text{у.п}}, C_{\text{зип}}, C_{\text{к.р}}, C_{\text{в.р}}, C_{\text{ээ}}, C_{\text{л.с}}, C_{\text{тр}}) + C_{\text{инж}}/R. \quad (1.6)$$

Составляющие выражения (1.6), которыми определяются эксплуатационные затраты и затраты на инженерное оборудование, являются сложными аналитическими функциями. Для приведения выражения (1.6) к форме, приемлемой для расчетов, проведен детальный анализ исходных данных, который показал, что затраты на оплату услуг промышленности, на закупку ЗИП, на войсковой и капитальный ремонт, на электроэнергию (горюче-смазочные материалы), на содержание личного состава, транспортные расходы, а также затраты на инженерное оборудование позиций для образца СРЛ после проведения доработок не превышают аналогичных затрат до проведения доработок. Кроме того, анализ исходных данных по модернизируемым блокам позволяет утверждать, что срок службы образца СРЛ после его модернизации не уменьшится. Поэтому расчеты, связанные с применением решения о целесообразности модернизации изделия, упрощаются: достаточно сравнивать только отношение величин  $C_0$  и  $R$  до и после модернизации образца радиоэлектронной техники.

Таким образом, анализу в стоимостных характеристиках изделия ИРЛ139, определяемых по методике, подлежит прежде всего изменяющаяся стоимость составных частей, блоков и в целом изделия и ее влияние на прогнозируемую долговечность изделия.

Для определения прогнозируемого ресурса изделия  $R$  используется метод, суть которого состоит в определении рационального значения ресурса в условиях ограниченных ассигнований.

Изделие включает  $n$  типов ресурсопределяющих составных частей, образующих множество  $M = \{M_1 \cup M_2 \cup \dots \cup M_n\}$ , где  $M_n$  — множество составных частей  $i$ -го типа,  $M_i = |M_i|$  — число составных частей по типам. Стоимости и ресурсы составных частей описываются соответственно множествами  $C_{\text{пк}} = \{C_{\text{пк}1}, C_{\text{пк}2}, \dots, C_{\text{пк}n}\}$  и  $R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$ . Ресурс  $R$  изделия в целом определяется ресурсом составных частей и может продлеваться путем замены выработавших ресурс составных частей. Поскольку стоимость ремонта заменяемых составных частей превышает стоимость новой модернизированной составной части, то ресурс изделия, кроме того, определяется средней наработкой на отказ  $T_0$  заменяемых составных частей, снятых с производства. Стоимость ремонта образца на местах эксплуатации может включать стоимость подготовительных работ  $C_{\text{р}}$  (стоимость вызова бригады ремонтников, доставки оборудования и др.), а при ремонте в ремонтных органах, кроме того, — стоимость доставки к месту ремонта и обратно  $C_{\text{р.д}}$ . Таким образом, в целом стоимость составных частей с учетом затрат на эксплуатацию  $C_{\text{эк}}$  при условии их ремонта в войсках, рассчитывается по формуле

$$C_{\text{эк}i} = r_i(C_{\text{р}i} + C_{\text{э}i})/T_{0i} + C_{\text{пк}i}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (1.7)$$

где  $C_{\text{э}i}$  — стоимость запасного элемента, необходимого для ремонта составной части  $i$ -го типа.

Задача заключается в поиске оптимального распределения ассигнований  $C_C$  на закупку образцов стоимостью  $C$ , организацию и проведение мероприятий, направленных на восполнение ресурса изделия ( $C_C - C$ ), при которых достигается максимальный суммарный ресурс  $W_R$  планируемых к закупке изделий в рамках выделенных ассигнований. Математически эта задача формулируется следующим образом:

$$W_R = N(C) R(C_C - C, E, P, Y) \rightarrow \max_{C, Y}; \quad (1.8)$$

$$0 < C < C_C; \quad (1.9)$$

$$R(C_C - C, E, P, Y) < T_m, \quad (1.10)$$

где  $N(C) = \lfloor C/C_0 \rfloor$  — закупаемое количество изделий;

$E = \langle n, M, C, r, T_0, C_0 \rangle$  — кортеж характеристик изделия;

$T_0 = \{T_{0i}\}, i = 1, \dots, n$  — множество, определяющее наработку на отказ составных частей;

$P = \langle C_{\text{р}}, C_{\text{р.д}} \rangle$  — кортеж характеристик системы ремонта;

$Y = \langle T, V \rangle$  — вариант организации мероприятий по восстановлению составных частей изделия;

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}, V = \{V_1, V_2, \dots, V_k\}$  — множества, включающие соответственно продолжительность и объемы по видам ремонта составных частей;

$T_m$  — срок морального старения изделия.

Метод решения задачи основывается на двухуровневом алгоритме оптимизации. На первом (нижнем) уровне решается задача обеспечения максимального ресурса образца в рамках заданных ассигнований (определение  $Y_{\text{опт}}(C_C - C)$ ), а на втором (верхнем) уровне — задача оптимального (рационального) распределения ассигнований, обеспечивающего максимум целевой функции  $W_R$ . Для решения задачи второго уровня используется метод простого перебора.

Задача первого уровня заключается в поиске оптимальных времен  $t_j - T$  и объемов  $V_j - V$  проводимых мероприятий. Здесь  $V = \{V_j, g_j, d_j\} - V$ , где  $g_j$  — виды и  $d_j$  — место проведения мероприятий по восстановлению составных частей.

Математическая задача записывается следующим образом:

$$R = \min \max \{t_j + r_j\}. \quad (1.11)$$

Задача решается методом отсева бесперспективных вариантов и определения окончания ветвления. Отсев бесперспективных вариантов выполнен исходя из принципа обеспечения единицы ресурса с минимальными затратами.

Полученные с использованием приведенного алгоритма зависимости позволяют определить рациональное значение ресурса изделия, необходимые затраты на его реализацию и, в случае необходимости, затраты на продление ресурса.

Решение задачи (1.1)–(1.10) показало, что рациональное значение ресурса изделия определяется лишь ресурсами и стоимостями составных частей. Таким образом, при замене отдельных составных частей изделия на другие (с новыми ресурсными и стоимостными характеристиками) рациональный ресурс изделия в целом следует пересматривать. Следовательно, при проведении расчетов по определению целесообразности модернизации изделий в выражении (1.1) наряду с изменением величины  $C_0$  будет изменяться величина  $R$ .

Применение приведенного аппарата позволило определить коэффициенты  $K_{C_i}$  снижения затрат на эксплуатацию составных частей старого и модернизированного типа в зависимости от запаса ресурса. Анализ полученных данных показал следующее:

- в силу того, что для любого значения запаса ресурса изделия коэффициент  $K_{C_i} > 1$ , то и интегральный коэффициент  $K_C > 1$ . Следовательно, в соответствии с критерием (1.2) модернизация изделия 1РЛ139 являлась целесообразной;
- замена вышедших из строя ЛБВ на предлагаемые блоки является эффективной независимо от остающегося запаса ресурса изделия 1РЛ139. Наряду с рассмотрением ресурсно-стоимостных аспектов целесообразности проведения доработок представлял значительный интерес вопрос улуч-

шения показателей эксплуатационной надежности изделий 1РЛ139 после их модернизации. Инженерный анализ эксплуатации СРЛ в эксплуатирующихся подразделениях и результаты обобщенных оценок показателей надежности, проводимых в течение пяти лет, показали, что значительное число отказов СРЛ старого парка приходится на приемную систему (15–20 %).

Таким образом, анализ полученных данных и результаты обоснования целесообразности выполнения работ по доработке изделия 1РЛ139 путем замены ЛБВ на блоки 394УВ в целом показывают следующее:

- доработки, связанные с заменой ЛБВ на твердотельные блоки, являются экономически целесообразными независимо от запаса ресурса изделия 1РЛ139;
- замена составных частей изделий 1РЛ139, находящихся в эксплуатации, на аналогичные, построенные на новой элементной базе и имеющие значительно увеличенные характеристики надежности, а также меньшую стоимость, является перспективным направлением в условиях ограничения ассигнований на переоснащение на новые СРЛ.

#### Обоснование актуального диапазона частот и требований к широкополосности блоков 394УВ

Диапазон частот, для которого требовалось создать усилительные блоки 384УВ, определялся реально выделенным для нужд радиоэлектронной техники. Учитывая тот факт, что значительная часть средств радиолокации данных потребителей работает в сантиметровом диапазоне радиоволн, было принято решение о первоочередной разработке усилителей именно для этого диапазона. Анализ актуального диапазона проведен путем сбора информации о типах ЛБВ, примененных в СРЛ, исследования их функциональных характеристик. Результаты анализа позволили определить диапазон работы СРЛ сантиметрового диапазона, а также обоснованно провести разбиение всего диапазона на поддиапазоны при разработке и создании блоков 394УВ.

Накопленный опыт при разработке, создании и внедрении блоков способствовал решению проблемы создания более широкополосных комплексированных изделий (серии У51), полоса усиления частот которых позволила объединить несколько поддиапазонов. Сведения приведены в таблице.

Учитывая необходимость создания приборов, обеспечивающих нераспространение сведений о конкретных частотах работы СРЛ, а также из соображения необходимости перекрытия всех частей диапазона волн, в котором работают СРЛ, было принято решение о предъявлении требования широкополосности разрабатываемых блоков 394УВ и

Тип блока	Наименование аналога	Применяемость
394УВ01	ЛБВ УВ74Ж (И)	1РЛ139 всех модификаций
394УВ02	ЛБВ УВ54, УВ74А	1РЛ130, 1РЛ141
394УВ03	ЛБВ УВ74	5Н87
394УВ04	ЛБВ УВ69В	5Н84 всех модификаций
394УВ05	ЛБВ УВ118В	19Ж6, 35Д6
394УВ06	ЛБВ УВ76	ПРВ16
394УВ07	УТ7	5Н66М
394УВ08	ЛБВ УВ15Н	С125
394УВ09	ЛБВ УВ12	С125

КИ У51 (в отличие от ЛБВ, которые являются резонансными, а следовательно, литерными приборами). Были проведены расчеты и определена оптимальная полоса частот, усиливаемых каждым типом блоков 394УВ.

### Обеспечение улучшения функциональных и эксплуатационных характеристик УВЧ

Улучшение чувствительности достигнуто за счет применения новейших элементной базы и технологии изготовления перспективных многофункциональных модулей типа МШУ (малозумящий усилитель), входящих в состав блоков 394УВ. В модулях применены отечественные корпусные и бескорпусные полупроводниковые приборы, разрешенные к применению в военной технике. Пассивные элементы выполнены по технологии напыления. Схемотехнические решения, использованные при проектировании модулей МШУ, позволили максимально снизить собственные шумы каскадов усиления. В результате достигнуто значение коэффициента шума блоков 394УВ и КИ У51, равное 3.

На основе анализа диапазона частот, в котором работают заменяемые аналоги ЛБВ, применяемые в гражданской авиации, было принято решение о первоочередном освоении диапазона 2,0—3,2 ГГц.

В актуальном диапазоне частот выделены полосы частот для усиления каждым типом блоков 394УВ (394УВ01, 394УВ02, 394УВ03 и т. д.), для комплексированных изделий У51 (У51123, У51123-1, У51123-2 и У51123-3) использован полный диапазон 2,0—3,2 ГГц.

Полоса частот выбрана таким образом, чтобы несмотря на негативный вклад расширения полосы пропускания УВЧ на чувствительность приемника достичь требуемой чувствительности. Обеспечение чувствительности стало возможным благодаря значительному снижению коэффициента шума блоков 394УВ и КИ У51 по сравнению с ЛБВ.

Проектирование усилителей в указанном диапазоне частот потребовало выполнения ряда условий по обеспечению необходимого коэффициента усиления и динамического диапазона блоков 394УВ и КИ У51 без самовозбуждения. Выполнение этих

условий стало возможным благодаря определению, с использованием математического аппарата электродинамики и теории электрорадиоцепей, оптимального сочетания частных параметров всех каскадов усилителя: как активных каскадов усиления, так и пассивных каскадов, определяющих частотные свойства усилителя в целом.

Стабилизация функциональных параметров блоков 394УВ и КИ У51 при воздействии дестабилизирующих факторов (температурного, электрического, механического) обеспечена благодаря использованию микрополосковой технологии с применением современных подложек, а также температуро-стабилизирующих и электростабилизирующих схемотехнических решений.

Повышение безотказности и долговечности блоков 394УВ и КИ У51 по сравнению с ЛБВ и полупроводниковыми отечественными аналогами достигнуто за счет выбора высоконадежной долговечной элементной базы, использования напыленных пассивных элементов (конденсаторов, резисторов), применения герметичных, в том числе газонаполненных, корпусов перспективных многофункциональных модулей на твердотельных СВЧ приборах МШУ и защитных устройств.

Кроме того, применены схемотехнические методы повышения надежности, например, использование щадящих режимов работы элементов в составе каскадов. В результате достигнута надежность, характеризуемая наработкой на отказ, равной 10000 тыс. ч.

Ремонтопригодность блоков 394УВ и КИ У51 представляла интерес в трех аспектах.

Во-первых, какое среднее время восстановления СРЛ обеспечивается при отказе блока 394УВ или КИ У51. За счет полной конструктивной совместимости и разъёмного соединения блоков 394УВ и КИ У51 с аппаратурой приемных трактов СРЛ достигается среднее время восстановления, не превышающее среднее время восстановления при замене отказавшей ЛБВ (менее 30 мин).

Во-вторых, для заказчика представляет интерес ремонтпригодности самих блоков 394УВ и КИ У51. В процессе разработки заложена возможность ремонта блоков путем агрегатной замены модулей МШУ и защитных устройств, которые могут быть заложены в комплект ЗИП СРЛ.

В-третьих, как заказчика, так и изготовителя (поставщика) интересовал вопрос ремонта самих МШУ и защитных устройств. Такая возможность также обеспечена на этапе проектирования конструкции и разработки спецификации субблоков. Путем замены навесных элементов возможен ремонт, а следовательно, и частичное восстановление ресурса (срока службы) модулей, блоков 394УВ и КИ У51 в целом.

При разработке выполнено предъявленное требование заказчика об отсутствии необходимости проведения каких-либо регулировочных работ при заменах блоков или в процессе плановых технических обслуживаний СРЛ.

#### Обеспечение возможности работы блоков 394УВ в аварийно-опасных режимах

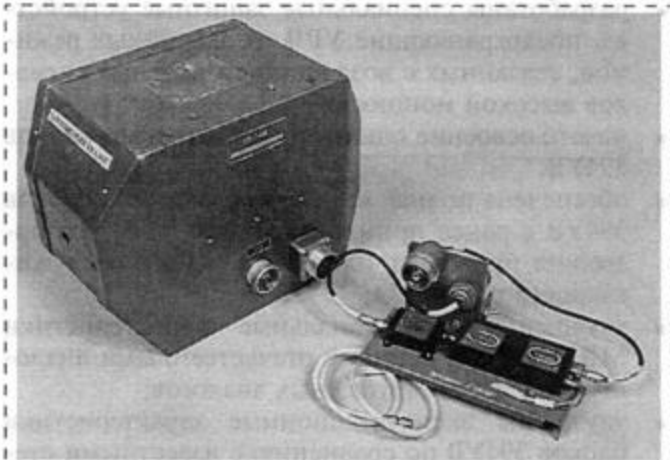
Перегрузки блоков 394УВ и КИ У51 возникают при воздействии на вход приемного тракта прямого сигнала от вблизи стоящих СРЛ, а также при неисправностях разрядников, защищающих приемный тракт от мощных сигналов собственного передатчика.

В режиме приема, когда разрядники погашены, в приемный тракт периодически попадают прямые сигналы от СРЛ, находящихся на одной позиции. Импульсная мощность этих сигналов в точке приема может достигать сотен ватт, что служит одной из основных причин выхода из строя современных твердотельных УВЧ, выпускаемых отечественной промышленностью. Для исключения выхода из строя блоков 394УВ и КИ У51 по указанной причине в модулях МШУ применены мощные рип-диоды. Такая защита позволила обеспечить работоспособность модулей МШУ при воздействии на вход средней мощности до 1 Вт и импульсной мощности (при скважности 1000 и длительности импульсов от 1,2 до 3 мс) до 1 кВт.

Однако в случае выхода из строя разрядников, защищающих приемный тракт от мощных сигналов собственного передатчика, данная защита оказалась недостаточной. Такая аварийная ситуация возникает достаточно часто, к тому же положение усложняется отсутствием электрического контроля за работой разрядников. Визуальный контроль исправности разрядников возможен только при техническом обслуживании. Поэтому были предприняты дополнительные меры защиты, а именно, введены дополнительные трехкаскадные защитные устройства на базе мощных рип-диодов. Такие защитные устройства (модули защитных устройств) обеспечивают работоспособность модулей МШУ при воздействии на вход блоков 394УВ и КИ У51 средней мощности до 4 Вт и импульсной мощности (при скважности 1000 и длительности импульсов от 1,2 до 3 мс) до 4 кВт. Таким образом, при выходе из строя разрядников обеспечивается защита от сигнала собственного передатчика в течение до 30 мин, что является достаточным для обнаружения обслуживающим персоналом СРЛ возникшей неисправности.

#### Обеспечение полной взаимозаменяемости с ранее применявшимися аналогами

Полная конструктивная взаимозаменяемость обеспечена благодаря следующим мерам, предпри-



нятым в процессе разработки и создания блоков 394УВ и КИ У51:

- размеры блоков 394УВ и КИ У51 всех типов значительно меньше, чем размеры заменяемых аналогов, что продемонстрировано на рисунке, где в качестве примера представлены ЛБВ типа УВ74Ж и заменяющий ее блок 394УВ01. Это позволяет размещать их в высвободившемся объеме;
- для крепления блоков к элементам приемного тракта применяются те же элементы конструкции, что и в случае крепления аналогов;
- подключение входов и выходов блоков выполняется с помощью разъемов тех же типов, которые применяются для подключения аналогов;
- подключение блоков к источнику питания осуществляется через разъем или всего через две пайки, выполняемые только при первой установке блоков 394УВ или КИ У51 (затем также через разъем).

Функциональная совместимость обеспечена тем, что входные и выходные параметры блоков 394УВ и комплексированных изделий по сравнению с замененными аналогами улучшены. Электрическая совместимость обеспечена полным согласованием по входным и выходным параметрам (волновое сопротивление, омическое сопротивление, рабочие напряжения и сила тока).

#### Выводы

В результате проведенных исследований были достигнуты следующие результаты:

- разработан ряд малошумящих импульсных сверхвысокочастотных блоков 394УВ для замены ЛБВ в приемных трактах СРЛ, которые могут быть применены как при создании перспективных СРЛ, так и для поддержания готовности к применению по назначению и продления срока службы СРЛ старого парка;

- разработаны специальные защитные устройства, предохраняющие УВЧ от аварийных режимов, связанных с воздействием входных сигналов высокой мощности;
- начато освоение опытного производства блоков 394УВ;
- обеспечена полная взаимозаменяемость блоков 394УВ с ранее применявшимися ЛБВ, что позволяет проводить их замену силами обслуживающего персонала;
- улучшены функциональные характеристики МШУ по сравнению с отечественными аналогами и частью зарубежных аналогов;
- улучшены эксплуатационные характеристики блоков 394УВ по сравнению с известными отечественными и зарубежными аналогами;
- улучшены тактико-технические и эксплуатационные характеристики СРЛ, в которые внедрены блоки 394УВ;

- получен существенный научно-технический задел, позволяющий осваивать другие диапазоны частот, улучшать функциональные и эксплуатационные характеристики УВЧ, создавать УВЧ для перспективных СРЛ как специального, так и гражданского назначения.

#### Список литературы

1. Белов Ю. Н. Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук "Разработка конструкции и технологии производства избирательных малошумящих интегральных СВЧ усилителей на полевых транзисторах", М., 1986.
2. Клич С. М. Проектирование СВЧ устройств радиолокационных приемников. М.: Сов. Радио, 1973.
3. Малорацкий С. Г., Явович Л. Р. Проектирование и расчет СВЧ элементов на полосковых линиях. М.: Сов. Радио, 1972.
4. Лебедев И. В. Развитие переключательных и защитных СВЧ устройств. М.: Радиотехника, 1999.

## КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МСТ

УДК 621.01:004.3

**И. М. Макаров**, акад. РАН, **В. М. Лохин**, д-р техн. наук, проф.,  
**С. В. Манько**, д-р техн. наук, доц.,  
**М. П. Романов**, д-р техн. наук, доц.,  
**А. А. Белькович**, **И. Б. Гарцев**, **С. В. Киор**,  
 Московский государственный институт радиотехники,  
 электроники и автоматики (Технический университет)

### ДИСТАНЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ СЛОЖНЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ СЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ЧАСТЬ I

*Рассматриваются принципы построения и опыт разработки системы дистанционного управления сложными динамическими объектами на основе современных сетевых технологий. Обсуждаются результаты экспериментов по дистанционному управлению манипуляционным роботом с использованием каналов Internet.*

Организация дистанционного управления сложными динамическими объектами на основе применения современных сетевых технологий является крайне важной научно-технической проблемой, которая представляет не

только большой научный, но и практический интерес для развития целого ряда различных прикладных областей, включая микросистемную технику. Так, микросистемная техника как новое междисциплинарное направле-

ние ставит своей целью развитие фундаментально-теоретических основ и технологического базиса для создания миниатюрных управляемых электромеханических устройств, многие сферы приложения которых ориентированы на массовое использование [1–3]. Наиболее показательные примеры такого рода перспективного применения устройств микросистемной техники в массовом масштабе связаны с формированием на их основе управляемых поверхностей для изменения динамических свойств покрываемых макрообъектов или активных объемных образований с варьируемой отражательной способностью. Соответствующая проблематика объединяет все многообразие вопросов построения так называемых многоагентных систем [4, 5], включая формирование и выбор стратегий группового управления, распределение функций при совместном решении поставленных задач с учетом ресурсов отдельных исполнителей, обеспе-



- разработаны специальные защитные устройства, предохраняющие УВЧ от аварийных режимов, связанных с воздействием входных сигналов высокой мощности;
- начато освоение опытного производства блоков 394УВ;
- обеспечена полная взаимозаменяемость блоков 394УВ с ранее применявшимися ЛБВ, что позволяет проводить их замену силами обслуживающего персонала;
- улучшены функциональные характеристики МШУ по сравнению с отечественными аналогами и частью зарубежных аналогов;
- улучшены эксплуатационные характеристики блоков 394УВ по сравнению с известными отечественными и зарубежными аналогами;
- улучшены тактико-технические и эксплуатационные характеристики СРЛ, в которые внедрены блоки 394УВ;

- получен существенный научно-технический задел, позволяющий осваивать другие диапазоны частот, улучшать функциональные и эксплуатационные характеристики УВЧ, создавать УВЧ для перспективных СРЛ как специального, так и гражданского назначения.

#### Список литературы

1. Белов Ю. Н. Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук "Разработка конструкции и технологии производства избирательных малошумящих интегральных СВЧ усилителей на полевых транзисторах", М., 1986.
2. Клич С. М. Проектирование СВЧ устройств радиолокационных приемников. М.: Сов. Радио, 1973.
3. Малорацкий С. Г., Явович Л. Р. Проектирование и расчет СВЧ элементов на полосковых линиях. М.: Сов. Радио, 1972.
4. Лебедев И. В. Развитие переключательных и защитных СВЧ устройств. М.: Радиотехника, 1999.

## КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МСТ

УДК 621.01:004.3

**И. М. Макаров**, акад. РАН, **В. М. Лохин**, д-р техн. наук, проф.,  
**С. В. Манько**, д-р техн. наук, доц.,  
**М. П. Романов**, д-р техн. наук, доц.,  
**А. А. Белькович**, **И. Б. Гарцев**, **С. В. Киор**,  
 Московский государственный институт радиотехники,  
 электроники и автоматики (Технический университет)

### ДИСТАНЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ СЛОЖНЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ СЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ЧАСТЬ I

*Рассматриваются принципы построения и опыт разработки системы дистанционного управления сложными динамическими объектами на основе современных сетевых технологий. Обсуждаются результаты экспериментов по дистанционному управлению манипуляционным роботом с использованием каналов Internet.*

Организация дистанционного управления сложными динамическими объектами на основе применения современных сетевых технологий является крайне важной научно-технической проблемой, которая представляет не

только большой научный, но и практический интерес для развития целого ряда различных прикладных областей, включая микросистемную технику. Так, микросистемная техника как новое междисциплинарное направле-

ние ставит своей целью развитие фундаментально-теоретических основ и технологического базиса для создания миниатюрных управляемых электромеханических устройств, многие сферы приложения которых ориентированы на массовое использование [1–3]. Наиболее показательные примеры такого рода перспективного применения устройств микросистемной техники в массовом масштабе связаны с формированием на их основе управляемых поверхностей для изменения динамических свойств покрываемых макрообъектов или активных объемных образований с варьируемой отражательной способностью. Соответствующая проблематика объединяет все многообразие вопросов построения так называемых многоагентных систем [4, 5], включая формирование и выбор стратегий группового управления, распределение функций при совместном решении поставленных задач с учетом ресурсов отдельных исполнителей, обеспе-

чение дистанционного контроля и командной связи с координацией взаимодействий и оперативным обменом информацией на базе современных сетевых технологий и т. д.

Кроме того, использование сетевых технологий для построения систем дистанционного управления имеет крайнюю актуальность для следующих приложений:

- разработки средств комплексной диагностики и настройки удаленного технологического и бытового оборудования;
- разработки средств проведения экспериментальных исследований на уникальных лабораторных установках с удаленным доступом;
- развития принципиально нового класса промышленных технологий уничтожения ядерного, химического и бактериологического оружия, а также для других типов потенциально опасных производственных процессов;
- разработки нового типа систем дистанционного управления роботами, космическими, летательными и подводными аппаратами, а также другими техническими устройствами, функционирующими в экстремальных или труднодоступных условиях;
- разработки средств и технологий дистанционного управления лабораторными установками и оборудованием в рамках систем открытого образования с возможностью удаленного доступа по каналам Internet.

Учитывая стремительное внедрение глобальной компьютерной сети Internet в практику повседневной жизни, организация дистанционного управления может иметь определенную актуальность и для целого ряда специфических приложений, связанных с необходимостью оперативного привлечения высококвалифицированных экспертов при использовании сложного оборудования

для проведения уникальных медицинских операций, научно-исследовательских и технических экспериментов и т. д.

Организация дистанционного управления традиционно является одним из важнейших предметов исследований в современной робототехнике. В настоящее время дистанционные системы управления средствами промышленной, экстремальной и бытовой робототехники принято разделять на следующие основные типы [6, 8]:

- командного управления;
- копирующего управления;
- полуавтоматического управления;
- супервизорного управления;
- дистанционно-автоматические.

При этом дистанционные системы управления роботами, как правило, строят с использованием протоколов обмена, опирающихся на проводные (электрические и оптоэлектронные) или беспроводные (радио) каналы передачи данных.

Разработка средств и методов дистанционного управления сложными техническими устройствами, системами и оборудованием на основе Internet-протоколов семейства TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol), как некоторая новая альтер-

натива, представляет несомненный интерес для различных прикладных областей и в этой связи становится одним из направлений приоритетных исследований в области современных компьютерных технологий.

Обобщенная структура дистанционной системы управления вне зависимости от ее типа, назначения и специфики организации канала передачи данных может быть приведена к единой схеме, которая показана на рис. 1, и включает следующие основные модули:

- удаленное управляющее устройство, предназначенное для формирования задающих управляющих воздействий или командных целеуказаний;
- блок преобразования данных, обеспечивающий кодирование и сжатие, а также восстановление управляющей информации на входе и выходе тракта передачи;
- тракт передачи данных, обеспечивающий надежный канал связи между объектом управления и удаленным управляющим устройством как в прямом, так и в обратном направлении;
- локальное (бортовое) управляющее устройство, предназначенное для формирования управляющих сигналов;

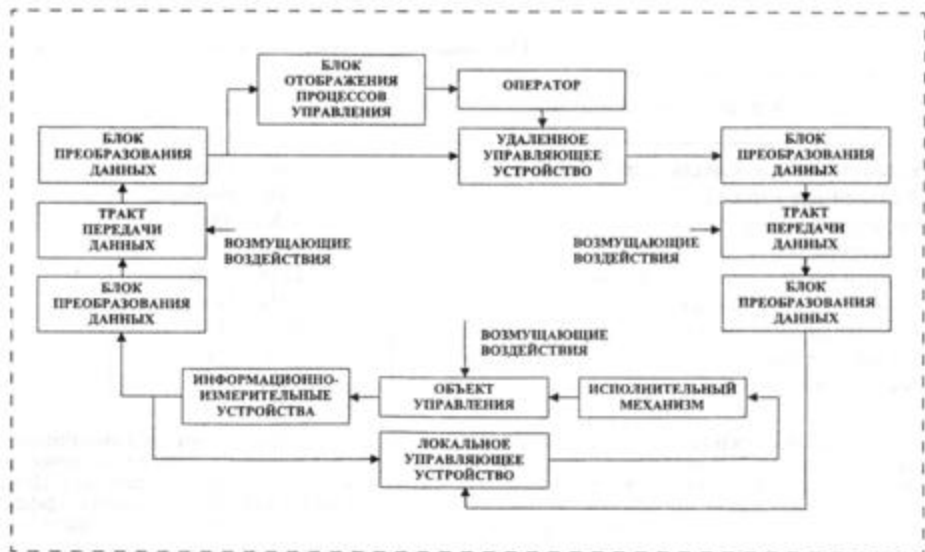


Рис. 1. Обобщенная структура системы дистанционного управления

- исполнительный механизм, обеспечивающий отработку управляющих сигналов;
- объект управления;
- информационно-измерительные устройства, предназначенные для организации обратной связи между объектом и системой управления;
- блок отображения процессов управления.

Эффективность систем дистанционного управления удаленными объектами во многом определяется наличием высокоскоростных каналов связи, обладающих большой пропускной способностью и обеспечивающих высокий уровень надежности при передаче управляющей и телеметрической, а также аудио-, видео- и другой необходимой информации с минимальным уровнем искажений и временных задержек. При этом следует иметь в виду, что требования по скорости, надежности и объемам передачи данных могут значительно различаться в зависимости от типа соответствующей информации. Так, например, управляющие и телеметрические данные должны передаваться максимально быстро, при этом потеря или искажение информации являются недопустимыми, так как могут привести к трагическому результату. В то же

время, некоторые потери или искажения аудио- и видеoinформации не считаются столь критичными, хотя требования по скорости ее передачи остаются такими же жесткими и высокими. Для целого ряда практических приложений важнейшей характеристикой систем дистанционного управления является ее мобильность, а также возможность оперативного развертывания каналов двусторонней связи с удаленным управляемым объектом.

Таким образом, важнейшие аспекты разработки систем дистанционного управления в общем случае связаны с решением следующих основных вопросов:

- организация канала связи между оператором и дистанционно-управляемым объектом;
- обеспечение надежности передачи управляющей, телеметрической аудио- и видеoinформации в реальном времени;
- реализация требуемой совокупности управляющих функций с учетом временных задержек в канале передачи информации.

Использование технологий глобальной компьютерной сети Internet открывает широкие перспективы в решении этих вопросов, имеющих принципиальное значение для создания систем дис-

танционного управления. При этом важнейшим преимуществом Internet как среды для передачи управляющей информации является независимость от аппаратных средств и типов каналов связи, используемых для подключения контролируемых объектов к сети. Так, в зависимости от специфики объекта управления и выполняемых им функций его подключение к сети Internet может обеспечиваться с помощью каналов связи множества различных типов, включая:

- коммутируемые каналы телефонной связи;
- выделенные линии;
- оптоволоконные линии;
- световые воздушные линии;
- инфракрасные воздушные линии;
- каналы радио-релейной связи;
- каналы спутниковой связи;
- каналы сотовой связи;
- локальные сети.

В каждом конкретном случае выбор оптимального варианта передачи информации должен осуществляться исходя из требований задачи дистанционного управления с учетом технических параметров каналов связи через Internet, основные характеристики которых приведены в таблице.

При этом стоимость подключения к глобальной компьютер-

Основные характеристики каналов связи в сети Internet

Канал передачи данных	Скорость передачи, бит/с	Средняя задержка, мс	Макс. дальность без ретрансляции, км
Коммутируемые каналы телефонной связи	300—128К	500—1500	5—7
Выделенные каналы	64К—2048К	25—30	30
Оптоволоконные каналы	53М—100Г	0,5	100
Воздушные оптические каналы	1М—2,5Г	0,5	2—3
Инфракрасные воздушные каналы	115К—10М	8—12	30
Радио-релейные каналы	64К—11М	7	100
Каналы спутниковой связи	9,6К—56К	550—750	6000—8000*
Каналы сотовой связи	9,6К—56К	250—550	3—5
Каналы локальных сетей	10М—1Г	0,25	0,1

\* Зона обслуживания современного российского геостационарного коммуникационного спутника "Экспресс-А", обеспечивающего высокоскоростной доступ в Internet и взятого в качестве примера в точке состояния 80° в. д., охватывает территорию России (за исключением Камчатки и Чукотки), Восточной Европы, районов Центральной и Средней Азии, Китая, стран Персидского залива [9, 10], что в пересчете на максимальную протяженность эффективной связи приблизительно составляет 6000—8000 км. Исходя из приведенной оценки с учетом количественного состава имеющихся и постоянно наращиваемых национальных и международных спутниковых группировок, каждая из которых достигает от единиц до нескольких десятков аппаратов, обслуживающих сеть Internet [11, 12], протяженность соответствующих каналов связи может полагаться неограниченной в глобальных масштабах.

ной сети, равно как и необходимого для этого оборудования, является достаточно малой (что на практике является крайне важным, а для ряда приложений может служить и решающим фактором).

Важное достоинство использования Internet-технологий в задачах дистанционного управления связано с гарантированным обеспечением достоверности передаваемой информации с помощью пула протоколов, сопряженных с IP.

Вместе с тем, организация дистанционного управления по каналам Internet сопряжена с необходимостью решения ряда крайне острых проблем.

Первая из них связана с обеспечением надежности подключения собственно к каналу связи через многочисленные шлюзы, репитеры, маршрутизаторы и другие аппаратные средства. Чтобы обезопасить систему от внезапных обрывов связи, которые могут возникнуть между управляющим устройством и контролируемым объектом, необходимо предусмотреть дублирование используемого тракта передачи данных с возможностью активизации запасного канала при отказе основного. Кроме того, высокоуровневый протокол связи между устройством и объектом управления должен непременно поддерживать контроль разрыва соединения и в случае обнаружения такового обеспечивать своевременный ввод заранее определенных режимов безопасной работы. При этом тайм-аут протокола связи должен быть заведомо меньше разницы времен, определяемых, с одной стороны, продолжительностью безаварийного функционирования объекта при отсутствии контроля, и максимальной длительностью перехода к безопасному режиму, с другой.

Вторая проблема обусловлена неравномерной скоростью передачи данных, которая варьируется в широком диапазоне и зави-

сит от текущей загрузки канала связи в соответствии с числом одновременно подключенных к сети пользователей. Эта проблема, к сожалению, имеет лишь частичные решения. Первое из них предполагает уменьшение собственного потока информации за счет применения разнообразных алгоритмов компрессии, а также установки интеллектуальных надстроек или математических экстраполяторов на самом объекте управления. Второе решение связано с проектированием системы в расчете на конкретную пропускную способность, а также (при отклонении жизненных реалий от ожидаемых) на обработку ситуаций аналогично случаям разрыва связи.

Третья проблема заключается в обеспечении конфиденциальности и защите информации, поскольку весь сетевой трафик потенциально может быть подвергнут анализу на любом из серверов, через которые он проходит, а следовательно, возникает реальная угроза не только несанкционированного доступа к совокупности передаваемых данных, но и случайного или намеренного их искажения. Традиционные пути в решении этой проблемы связаны с разработкой и применением специализированных алгоритмов шифрования, верификации и т. д. Однако в подавляющем большинстве ситуаций безопасность является более приоритетным фактором по сравнению со всеми прочими, что полностью оправдывает такой подход, несмотря на необходимость привлечения дополнительных вычислительных ресурсов для его реализации.

И наконец, последняя из наиболее важных проблем дистанционного управления по каналам Internet вызвана необходимостью предотвращения конкурентных соединений, когда несколько пользователей независимо друг от друга пытаются одновременно воз-

действовать на контролируемый объект. Соответствующее решение требует построения тщательно продуманных протоколов обмена информацией, контролирующими подобными ситуациями (а также, возможно, и ситуациями с попытками несанкционированного доступа).

Практическая апробация принципов и технологий дистанционного управления по каналам Internet потребовала проведения цикла экспериментальных исследований и разработок, опытным полигоном для которых послужил учебный образец гибкой производственной системы (ГПС), размещенной в одной из лабораторий кафедры "Проблемы управления" МИРЭА. В состав учебной ГПС входят пять следующих аппаратно-независимых робототехнических модулей (рис. 2):

- автоматизированный склад;
- роботизированный центр фрезерной обработки;
- роботизированный сборочный центр;
- роботизированный центр токарной обработки;
- энергонезависимый транспортный робот.

Все модули управляются на базе промышленных компьютеров фирмы "Octagon Systems", соединенных общей локальной вычислительной сетью между собой и с главной ЭВМ на Intel-платформе (рис. 3). Такая идеология отвечает современным тенденциям к организации гибкого производства, позволяет изменять его конфигурацию и строить сложные иерархические системы управления технологическим процессом.

Каждый модуль ориентирован на выполнение определенных технологических операций и может функционировать как в составе ГПС, так и абсолютно независимо. Использование операционной системы QNX со встроенным механизмом сообщений позволяет обеспечить информационный обмен между модулями и главной ЭВМ.

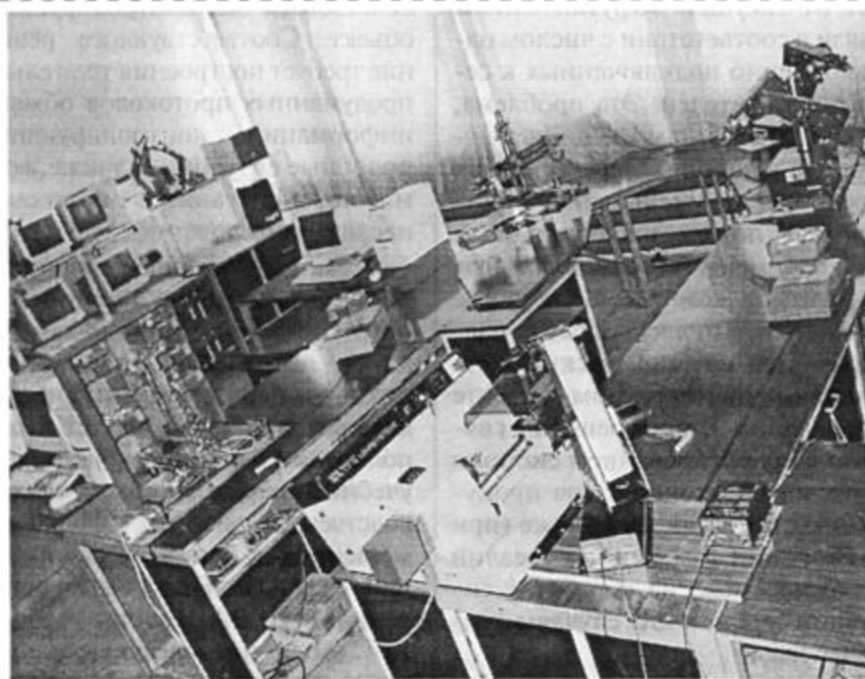


Рис. 2. Экспериментальный образец учебной мини-ГПС в специализированной лаборатории кафедры "Проблемы управления" МИРЭА



Рис. 3. Обобщенная структура системы управления учебной ГПС

В функции главной ЭВМ входят распределение заданий между модулями в соответствии со схемой технологического процесса, а также контроль за выполнением требуемых операций. Таким образом, она исполняет роль супервизора, который координирует общий ход технологического процесса и в зависимости от состояния его основных параметров запускает и/или останавливает работу тех или иных узлов ГПС. Интерфейс с пользователями обеспечивается подключением главной ЭВМ к каналам Internet. Абонент сети, находящийся в произвольной точке земного шара и обладающий необходимым доступом, может перекачать (на свой компьютер) и запустить соответствующую программу, которая работает под операционной системой Windows и устанавливает по стандартному Internet-протоколу TCP/IP соединение с главной ЭВМ.

Как показано на рис. 4, программное обеспечение системы управления построено по иерар-

хическому принципу, который предписывает сильную стандартизацию вертикальных межуровневых взаимодействий.

Так, взаимодействие между интерфейсным и координационным уровнями организовано по технологии клиент-сервер. Расположение сервера координационного уровня в терминах протокола IP детерминировано: ему соответствуют однозначные адрес и имя. И наоборот, интерфейсный уровень не имеет заранее определенных координат, а его активизация может обеспечиваться с любого IP-адреса. При реализации такого подхода соединение

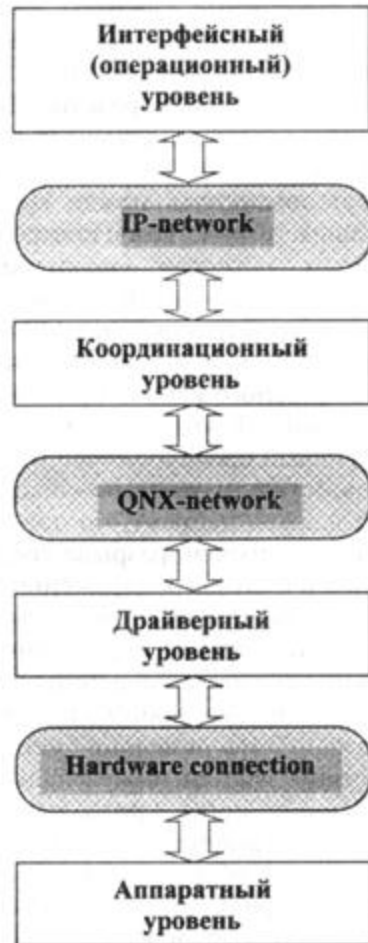


Рис. 4. Иерархическая структура программного обеспечения системы управления учебной ГПС

иницируется исключительно со стороны интерфейсного уровня, выступающего в качестве клиента. Координационный же уровень, размещенный на главной ЭВМ, находится в состоянии постоянного ожидания входящего соединения. Физически это означает, что программа, реализующая координационный уровень, при запуске резервирует за собой один из портов IP и переходит в режим ожидания входящей коннекции по своему IP-адресу и по конкретному зарезервированному IP-порту, не препятствуя таким образом выполнению прочих сервисных функций IP.

По каждому IP-порту может устанавливаться несколько соединений, но при необходимости можно ограничиться одним, тем самым решив проблему конкурентных коннекций.

Для частичного решения проблемы несанкционированного доступа Internet-узлы, от которых принимаются запросы на соединение, ограничены списком по каждому из портов. При этом разделение списков с указанием узлов, соответственно имеющих допуск к управлению реальным оборудованием и к наблюдению за его работой, добавляет гибкости системе, не уменьшая ее надежности.

Каждый сеанс связи начинается с запроса на установление соединения между программой-клиентом, функционирующей на интерфейсном уровне протокола связи, и программой-сервером координационного уровня. Иницируя сеанс связи, клиент посылает свою идентификационную информацию на сервер, который при установке соединения (если канал не занят, аппаратура функционирует и т. д.) отправляет ответный идентификационный пакет. Дальнейшее взаимодействие между клиентом и сервером происходит с помощью простейших посылок, схематичная структура которых изображена на рис. 5.

Устройство (1 байт)
Команда (1 байт)
Данные (46 байт)

Рис. 5. Структура посылки, используемой для передачи данных между клиентом и сервером

Первый байт передаваемой для сервера посылки символизирует то устройство, которому предназначено обращение клиента. Поскольку значения 0 и 255 зарезервированы для общесистемных обращений, количество отдельно адресуемых устройств ограничено числом 254, что является вполне достаточным для большинства приложений. В зависимости от значения первого байта дальнейшая обработка посылки передается соответствующему модулю сервера, который должен обеспечивать не только идентификацию и доставку команды, предназначенной для конкретного устройства, но и отправку соответствующего ответа для клиента.

Второй байт посылки определяет команду, которую необходимо отработать драйверу устройства, указанного первым байтом. Эта команда может регламентировать как выполнение какого-либо физического действия (по выводу устройства в нулевую позицию, реализации заданного движения, позиционированию в конкретной точке и т. п.), так и прием необходимых данных от информационно-измерительной системы. При этом число различных команд является практически не ограниченным, так как в случае, если содержимое командного байта соответствует 255, то первый байт следующего далее блока данных интерпретируется координационным уровнем как расширение командного.

Последняя часть посылки предназначена для передачи тех или иных данных, которые могут

потребоваться драйверу устройства для выполнения необходимой функции.

Следует отметить, что наличие контролирующих механизмов в составе серверных процедур обработки поступающих команд не гарантирует стопроцентного установления ошибок в наборе данных и, как результат, предотвращения их последствий. Поэтому разработанное программное обеспечение предусматривает возможность отладочного режима работы, позволяющего проследить за правильностью отработки управляющих команд без реального взаимодействия с соответствующими аппаратными средствами.

#### Список литературы

1. Климов Д. М., Васильев А. А., Лучинин В. В., Мальцев П. П. Перспективы развития микросистемной техники в XXI веке // Микросистемная техника. 1999. № 1.
2. Рубцов И. В., Нестеров В. Е., Рубцов В. И. Современная зарубежная военная микро- и мини-робототехника // Микросистемная техника. 2000. № 3.
3. Мальцев П. П., Пономарев К. М., Степанов Ю. И. "Умная пыль" на основе микросистемной техники // Микросистемная техника. 2000. № 4.
4. Городецкий В. И. Многоагентные системы: современное состояние исследований и перспективы применения // Новости искусственного интеллекта. 1996. № 1.
5. Каляев И. А. Принципы организации децентрализованных систем управления коллективов микророботов // Мехатроника, 2000. № 6.
6. Дистанционно управляемые роботы и манипуляторы / Кулешов В. С., Лакота Н. А., Андрионин В. В. и др.; Под общ. ред. Попова Е. П. М.: Машиностроение, 1986.
7. Проектирование следящих систем двустороннего действия. Под ред. В. С. Кулешова // М.: Машиностроение, 1980.
8. Кулаков Ф. М. Супервизорное управление манипуляционными роботами // М.: Наука, 1980.
9. Лаитратов К., Каменцев В. Космический "Экспресс" с литерой А // Новости космонавтики. 1999. № 12.
10. Журавин Ю. "Экспресс-А" вышел на орбиту // Новости космонавтики. 2000. № 5.
11. Голотюки С. Экспресс-АМ / Новости космонавтики. 2000. № 10.
12. Зайцев А. Спутниковая связь прирастает Интернетом // Новости космонавтики. 2000. № 10.

# МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МСТ

УДК 537.226.33

А. В. Шильников, д-р физ.-мат. наук,  
А. И. Бурханов, канд физ.-мат. наук, А. С. Кудашев,  
Волгоградская государственная  
архитектурно-строительная академия  
И. Н. Захарченко, канд. физ.-мат. наук,  
С. Г. Гах, канд. физ.-мат. наук,  
В. А. Алешин, канд. физ.-мат. наук,  
Научно-исследовательский институт физики  
при Ростовском государственном университете

## НИЗКО- И ИНФРАНИЗКОЧАСТОТНАЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ И ПЕРЕПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ В СЕГНЕТОПЛЕНКАХ НА ПОДЛОЖКАХ ИЗ КОРРОЗИОННО-СТОЙКОЙ СТАЛИ\*

Представлены результаты исследования диэлектрических свойств сегнетоэлектрических пленок на основе цирконата-титаната свинца (ЦТС), полученных методом катодного ВЧ распыления на подложках из стали. Обнаружена релаксация поляризации в области инфранизких частот, которая интерпретируется на основе релаксации типа Коула-Коула. По методике Сойера-Тауэра получены переполяризационные характеристики в диапазоне температур от  $-100^\circ\text{C}$  до  $+30^\circ\text{C}$ . Выявлен (наряду с доменным вкладом в переполяризационные процессы) вклад межслойной поляризации, обусловленный дефектностью структуры материала.

### Введение

Сегнетоэлектрические пленки находят все более широкое применение в новом поколении микроэлектронных устройств типа энергонезависимой сегнетоэлектрической оперативной памяти (NVFRAM); в тонкопленочных конденсаторах с высокой диэлектрической проницаемостью, применяемых для динамической памяти произвольного доступа с высокой плотностью (DRAM); в инфракрасных детекторах нормальной температуры; в микроэлектромеханических системах (MEMS) и т. д. [1]. Существуют различные способы изготовления

такого рода пленок (что с достаточной полнотой представлено в [2]), позволяющие в весьма широких пределах варьировать свойства получаемых объектов. В настоящее время эти и другие способы получили дальнейшее успешное развитие (см., например, [3]). В то же время применение достаточно дорогих благородных металлов Pt и Au делает проблему внедрения более дешевых материалов для этих целей очень актуальной.

Целью настоящей работы являлось изучение поведения диэлектрического отклика и выявление особенностей процесса поляризации и переполяризации в пленках при использовании в качестве подложки коррозионно-стойкой стали.

### Методика измерений и образцы

При измерении комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon^*$  (действительная составляющая  $\epsilon'$  и мнимая  $\epsilon''$ ) в ультраслабом ( $U < 0,01$  В) поле в диапазоне частот  $\nu$  от 0,1 Гц до 2,5 кГц и

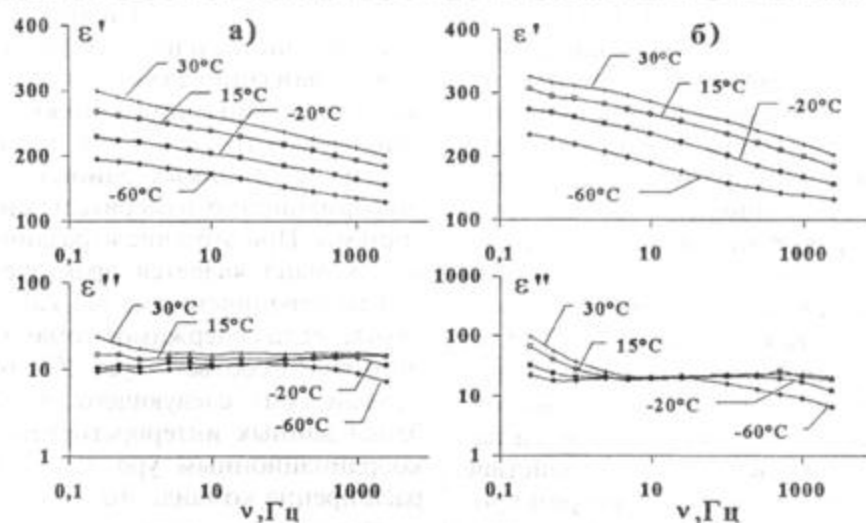


Рис. 1. Частотные зависимости вещественной  $\epsilon'(f)$  и мнимой  $\epsilon''(f)$  частей комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon^*$  при различной температуре для образца № 1 (а) и № 2 (б)

\* Работа была поддержана РФФИ (грант № 02-02-16232).

температурном интервале от  $-100$  до  $+40$  °С применялся мостовой метод измерения. Для наблюдения петель поляризации при различных амплитудах прикладываемого напряжения (от 10 до 55 В) и частотах 1, 10, 100 и 1000 Гц была использована модифицированная установка со схемой Сойера—Тауэра. Измерения  $\epsilon'(v)$ ,  $\epsilon''(v)$ , а также петель поляризации проводились в квазистатическом режиме охлаждения при фиксации температуры в промежуточных токах с точностью не хуже  $\pm 0,1$  К.

Сегнетоэлектрические пленки были изготовлены в НИИ физики Ростовского университета (г. Ростов-на-Дону) методом ВЧ катодного распыления мишеней стехиометрического состава цирконата-титаната свинца (ЦТС) в атмосфере кислорода с осаждением на подложки из коррозионно-стойкой стали. Толщина пленок составляла 2 мкм, площадь верхнего электрода — 1,76 мм<sup>2</sup>. В качестве контрэлектродов использовался алюминий. Были выбраны два одинаковых состава пленки (условно № 1 и № 2), различающихся некоторыми условиями технологии получения данных образцов.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены частотные зависимости вещественной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon^*$  при различной температуре для двух образцов. При анализе  $\epsilon'(v)$  и  $\epsilon''(v)$  с применением уравнения Коула-Коула

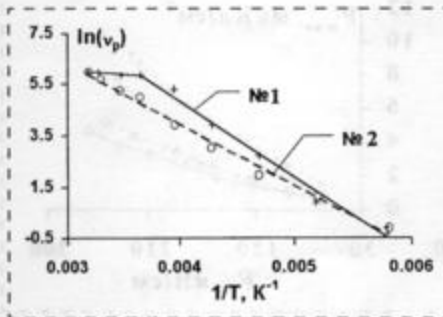


Рис. 2. Зависимости логарифма частоты релаксации поляризации от обратной температуры для двух образцов

где  $\epsilon_s$ ,  $\epsilon_\infty$  — соответственно низко- и высокочастотный пределы области дисперсии  $\epsilon^*$ ;  $\omega = 2\pi v$  — круговая частота измерительного поля;  $\tau = 1/(2\pi v_p)$  — наиболее вероятное время релаксации;  $v_p$  — наиболее вероятная частота релаксации;  $\alpha$  — параметр распределения, было установлено, что для всего интервала температур выполняется термоактивационный закон Аррениуса  $v_p = v_\infty \times \exp[-U_a/(kT)]$  (рис. 2), где  $v_\infty$  — предэкспоненциальный множитель;  $U_a$  — энергия активации;  $k$  — постоянная Больцмана. Значение  $U_a$  для образца № 2 составило  $0,25 \pm 0,01$  эВ. Для образца № 1 наблюдаются два участка, где выполняется закон Аррениуса. Первый (высокотемпературный) при  $T > 0$  °С со значениями

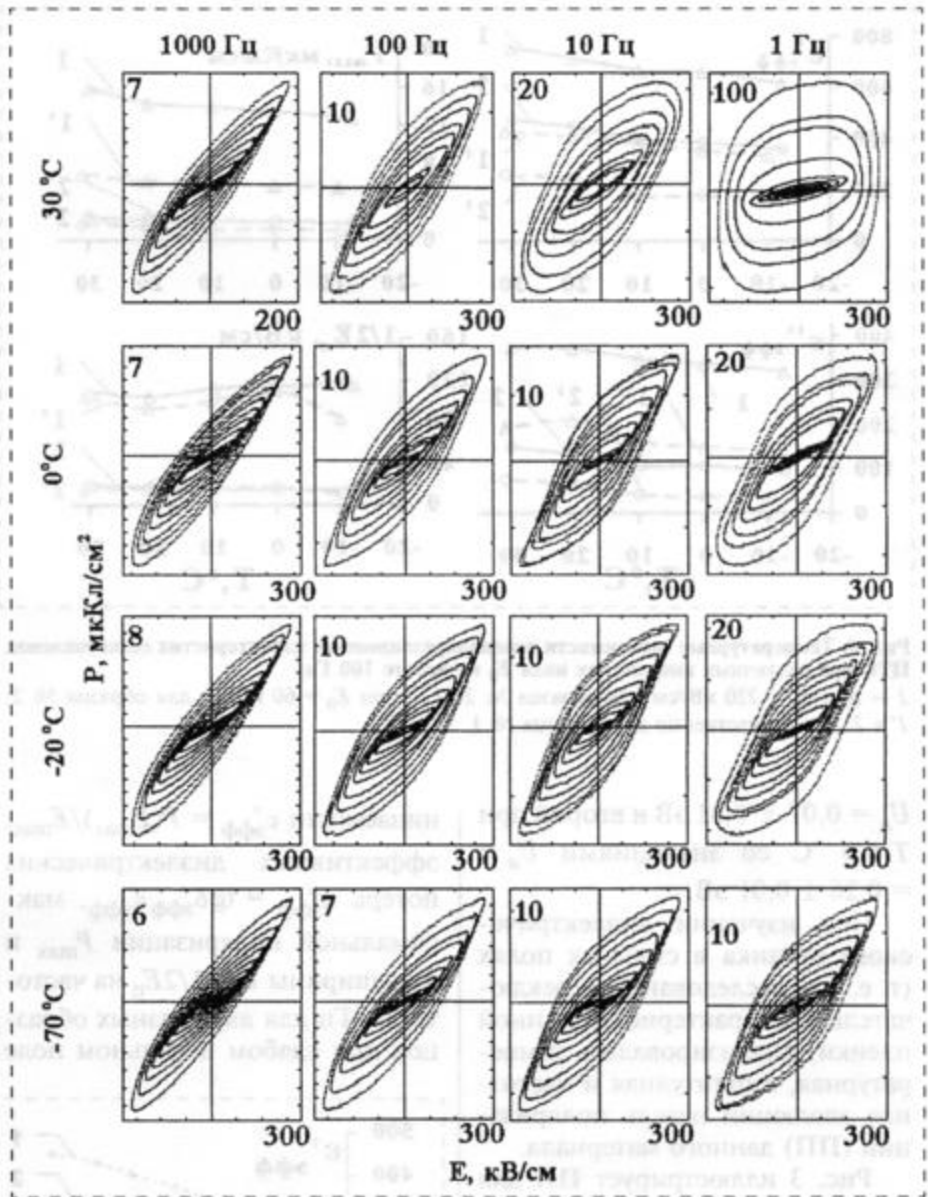


Рис. 3. Амплитудная, частотная и температурная эволюции петель поляризации сегнетопленки ЦТС (ячейка № 1)

лаксации;  $\alpha$  — параметр распределения, было установлено, что для всего интервала температур выполняется термоактивационный закон Аррениуса  $v_p = v_\infty \times \exp[-U_a/(kT)]$  (рис. 2), где  $v_\infty$  — предэкспоненциальный множитель;  $U_a$  — энергия активации;  $k$  — постоянная Больцмана. Значение  $U_a$  для образца № 2 составило  $0,25 \pm 0,01$  эВ. Для образца № 1 наблюдаются два участка, где выполняется закон Аррениуса. Первый (высокотемпературный) при  $T > 0$  °С со значениями

$$\epsilon^* = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{[1 + (i\omega\tau)^{1-\alpha}]}, \quad (1)$$

где  $\epsilon_s$ ,  $\epsilon_\infty$  — соответственно низко- и высокочастотный пределы области дисперсии  $\epsilon^*$ ;  $\omega = 2\pi v$  — круговая частота измерительного поля;  $\tau = 1/(2\pi v_p)$  — наиболее вероятное время релаксации;  $v_p$  — наиболее вероятная частота релаксации;  $\alpha$  — параметр распределения, было установлено, что для всего интервала температур выполняется термоактивационный закон Аррениуса  $v_p = v_\infty \times \exp[-U_a/(kT)]$  (рис. 2), где  $v_\infty$  — предэкспоненциальный множитель;  $U_a$  — энергия активации;  $k$  — постоянная Больцмана. Значение  $U_a$  для образца № 2 составило  $0,25 \pm 0,01$  эВ. Для образца № 1 наблюдаются два участка, где выполняется закон Аррениуса. Первый (высокотемпературный) при  $T > 0$  °С со значениями

лаксации;  $\alpha$  — параметр распределения, было установлено, что для всего интервала температур выполняется термоактивационный закон Аррениуса  $v_p = v_\infty \times \exp[-U_a/(kT)]$  (рис. 2), где  $v_\infty$  — предэкспоненциальный множитель;  $U_a$  — энергия активации;  $k$  — постоянная Больцмана. Значение  $U_a$  для образца № 2 составило  $0,25 \pm 0,01$  эВ. Для образца № 1 наблюдаются два участка, где выполняется закон Аррениуса. Первый (высокотемпературный) при  $T > 0$  °С со значениями



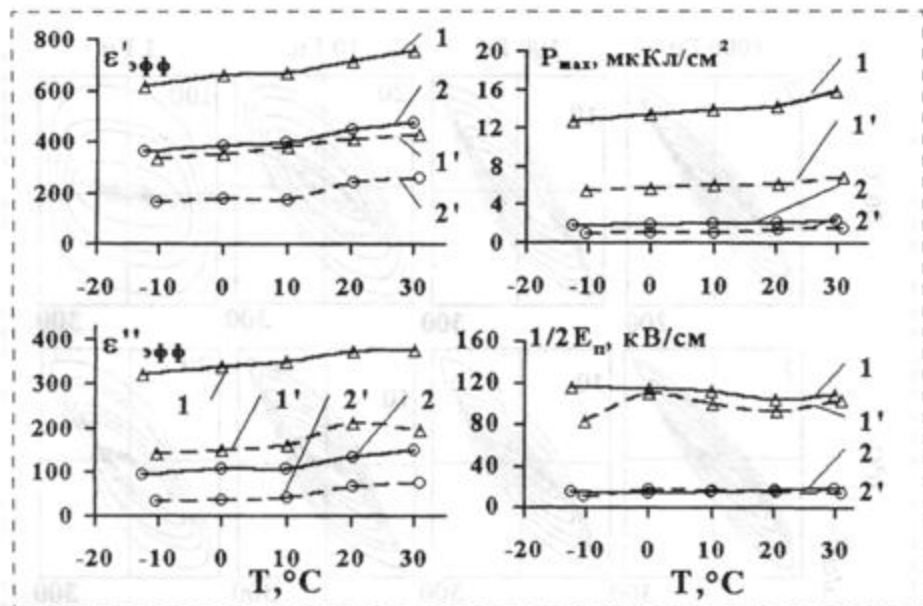


Рис. 4. Температурные зависимости переполяризационных характеристик сегнетопленок ЦТС при различных амплитудах поля  $E_0$  и частоте 100 Гц: 1 — при  $E_0 = 220$  кВ/см для образца № 2; 2 — при  $E_0 = 60$  кВ/см для образца № 2; 1' и 2' — соответственно для образца № 1

$U_a = 0,07 \pm 0,01$  эВ и второй при  $T < 0$  °C со значениями  $U_a = 0,26 \pm 0,01$  эВ.

При изучении диэлектрического отклика в сильных полях (т. е. при исследовании переключательных характеристик данной пленки) анализировалась температурная, амплитудная и частотная эволюция петель поляризации (ПП) данного материала.

Рис. 3 иллюстрирует ПП для четырех выбранных температур, полей и частот состава № 1. Заметна существенная частотная зависимость формы ПП. Для поля  $E \approx 300$  кВ прослеживается начало выхода ПП на насыщение при  $\nu < 10$  Гц. Овалообразная форма ПП при  $\nu = 1$  Гц вероятнее всего связана с вкладом проводимости (в пользу чего говорит температурная эволюция формы ПП на  $\nu = 1$  Гц). Такой же характер ПП наблюдается и для образца № 2.

Более детально отличие в значениях параметров поляризации иллюстрирует рис. 4, где показаны температурные зависимости эффективной диэлектрической про-

ницаемости  $\epsilon'_{эфф} = P(E_{max})/E_{max}$ , эффективных диэлектрических потерь  $\epsilon''_{эфф} = \text{tg } \delta_{эфф} \epsilon'_{эфф}$ , максимальной поляризации  $P_{max}$  и полуширины ПП  $1/2E_n$  на частоте 100 Гц для двух разных образцов при слабом и сильном поле

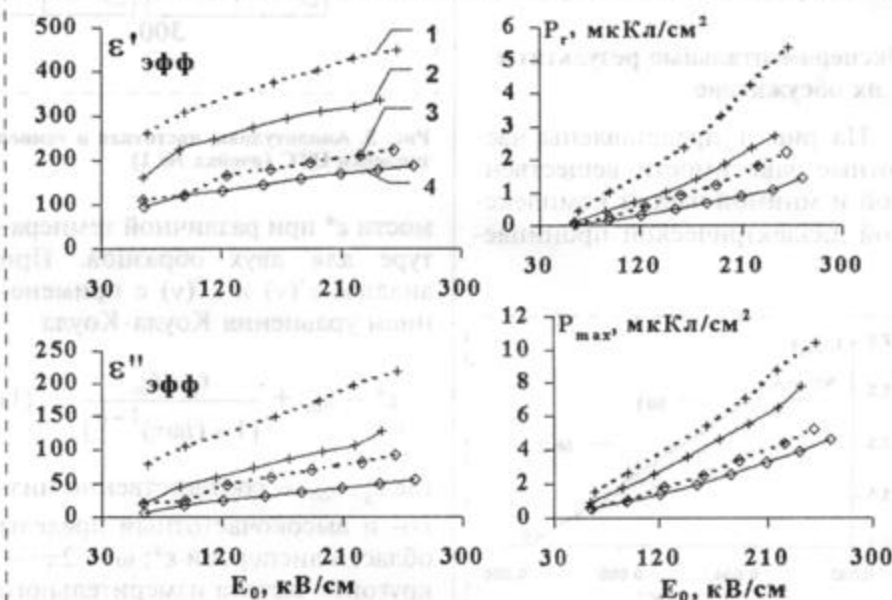


Рис. 5. Зависимости переполяризационных характеристик от амплитуды прикладываемого поля для образца № 1: 1 — 100 Гц; 2 — 1 кГц для 30 °C; 3 — 100 Гц; 4 — 1 кГц для -70 °C

$E_0$ . Разделение на слабые и сильные поля проведено согласно [4]. В данном случае слабым полем считается  $E_0 \approx 60$  кВ/см (где соответствующий сигнал  $U = 10$  В), и ПП представляют собой квази-рэлеевские двуугольники, а сильным  $E_0 \approx 220$  кВ/см ( $U = 45$  В) для пленки толщиной  $\approx 2$  мкм, что соответствует началу выхода ПП на насыщение на частоте  $\nu \leq 10$  Гц.

На рис. 4 видно, что  $\epsilon'_{эфф}(T)$  имеет практически линейный рост как для образца № 1, так и для образца № 2, но  $\epsilon'_{эфф}$  для образца № 2 примерно в 2 раза больше, чем для образца № 1 в рассматриваемом диапазоне температур. Для  $\epsilon''_{эфф}$  наблюдается примерно такая же тенденция. Различие в поведении  $\epsilon''_{эфф}$  для образцов № 1 и № 2 хорошо согласуется с данными по  $\epsilon''$  в ультраслабых полях (см. рис. 1, а, б).

Как видно на рис. 4, полуширина петли  $1/2E_n(T)$  слабо зависит от температуры как в сильных, так и в слабых полях для обоих образцов. В сильных полях она пропорциональна коэрцитивному полю  $E_c$  и, таким обра-

зом, можно считать, что данный параметр в обоих образцах практически одинаков.

Более высокие значения максимальной поляризации образца № 2 по сравнению с образцом № 1 с учетом совпадения ширины петли могут обуславливаться как некоторым вкладом межслойной поляризации, так и более лабильной доменной структурой (более "мягкий" для переполяризации образец). Об этом, в частности, свидетельствуют более высокие значения потерь для образца № 2 в инфранизкочастотном диапазоне измерительных полей.

На рис. 5 представлены амплитудные зависимости  $\varepsilon'_{эфф}(E_0)$ ,  $\varepsilon''_{эфф}(E_0)$ ,  $P_r(E_0)$ ,  $P_{max}(E_0)$  для образца № 1 для различных частот измерительного сигнала. На рис. 5 видно, что для  $P_r(E_0)$  и  $P_{max}(E_0)$  имеет место существенная зависимость от частоты измерительного сигнала, когда нелинейный характер кривой при  $\nu = 100$  Гц наблюдается в более слабых полях, чем при  $\nu = 1$  кГц. Такое поведение характеристик согласуется с тем, что основной вклад в переполяризационные характеристики все-таки связан с доменными процессами, о чем от-

мечено в [5] для других сегнетоэлектрических пленок.

#### Список литературы

1. Scott J. S. // *Ferroelectrics Review* 1. 1998. P. 3—4.
2. Дудкевич В. П., Фесенко Е. Г. Физика сегнетоэлектрических пленок. Ростов-на-Дону: Изд. РГУ, 1979. С. 154—166.
3. Воротилов К. А., Сигов А. С., Туревская Е. А., Берго В. Б., Соколов С. В. // *Микроэлектроника*. 1999. № 28. С. 193—200.
4. Шильников А. В., Галиярова Н. М., Горин С. В., Васильев Д. Г., Вологирова Л. Х. // *Известия РАН СССР*. 1991. Т. 55. № 3. С. 578—582.
5. Шильников А. В., Оцарев И. В., Бурханов А. И., Нестеров В. Н., Сигов А. С., Воротилов К. А. // *Изв. РАН Сер. физ. М.: Наука*. 2000. Т. 64. № 6. С. 1239—1241.

УДК 621.397 + 628.9.03

**И. И. Литвак**, д-р техн. наук, проф., МИЭМ,  
**Н. В. Пахомов**, канд. техн. наук,  
Секция прикладных проблем  
при Президиуме РАН

## СРЕДСТВА ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ НА БАЗЕ ОРГАНИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

*Излагаются новые данные о состоянии разработок и применении перспективных средств отображения информации с использованием органических электролюминесцентных приборов. Материал статьи базируется на зарубежных публикациях и докладах 2000—2001 гг.*

Внимание заказчиков средств отображения информации для подвижных комплексов (включая заказчиков авионики) в последние годы начали привлекать органические светоизлучающие электролюминесцентные приборы — органический электролюминесцентный дисплей (OLED).

Основные требования к современным дисплеям такого назначения могут быть кратко сформулированы следующим образом:

- высокая яркость и высокая контрастность;
- большее число цветов (полноцветное изображение);
- высокая разрешающая способность;
- плоская тонкая конструкция;

- малая масса;
- малое потребление мощности;
- низкая цена.

Часто эти требования не могут быть выполнены в совокупности. Так, не существует дисплея на плоской панели (FPD), который являлся бы подходящим для подвижных комплексов и полностью выполнял все требования [1].

Хотя вакуумно-люминесцентные (VFD), электролюминесцентные (EL) и пассивные матричные жидкокристаллические индикаторы (LCD) уже нашли применение в приборных панелях самолетов, в автомобильных радиоприемниках и приборных щитках, однако эти плоские дисплеи (FPD) не способны удовлетворить жестким и разнообразным требованиям к авиационной электронике, к средствам отображения информации в наземной военной технике [1—3].

Информация последних лет позволяет с достаточными основаниями предполагать [4—9], что OLED-технология, появившаяся как ведущая FPD-технология следующего поколения, сможет соответствовать этим строгим требованиям. Приборы OLED — яркие, светоизлучающие, полноцветные приборы, которые обеспечивают малую потребляемую мощность, широкий угол обзора, хорошую контрастность и, соответственно, точность и скорость зрительного восприятия. Кроме того, приборы OLED компактны и легки, тепло- и холодоустойчивы, выдерживают значительные механические нагрузки, имеют достаточный срок службы.

зом, можно считать, что данный параметр в обоих образцах практически одинаков.

Более высокие значения максимальной поляризации образца № 2 по сравнению с образцом № 1 с учетом совпадения ширины петли могут обуславливаться как некоторым вкладом межслойной поляризации, так и более лабильной доменной структурой (более "мягкий" для переполяризации образец). Об этом, в частности, свидетельствуют более высокие значения потерь для образца № 2 в инфранизкочастотном диапазоне измерительных полей.

На рис. 5 представлены амплитудные зависимости  $\varepsilon'_{эфф}(E_0)$ ,  $\varepsilon''_{эфф}(E_0)$ ,  $P_r(E_0)$ ,  $P_{max}(E_0)$  для образца № 1 для различных частот измерительного сигнала. На рис. 5 видно, что для  $P_r(E_0)$  и  $P_{max}(E_0)$  имеет место существенная зависимость от частоты измерительного сигнала, когда нелинейный характер кривой при  $\nu = 100$  Гц наблюдается в более слабых полях, чем при  $\nu = 1$  кГц. Такое поведение характеристик согласуется с тем, что основной вклад в переполяризационные характеристики все-таки связан с доменными процессами, о чем от-

мечено в [5] для других сегнетоэлектрических пленок.

#### Список литературы

1. Scott J. S. // *Ferroelectrics Review* 1. 1998. P. 3—4.
2. Дудкевич В. П., Фесенко Е. Г. Физика сегнетоэлектрических пленок. Ростов-на-Дону: Изд. РГУ, 1979. С. 154—166.
3. Воротилов К. А., Сигов А. С., Туревская Е. А., Берго В. Б., Соколов С. В. // *Микроэлектроника*. 1999. № 28. С. 193—200.
4. Шильников А. В., Галиярова Н. М., Горин С. В., Васильев Д. Г., Вологирова Л. Х. // *Известия РАН СССР*. 1991. Т. 55. № 3. С. 578—582.
5. Шильников А. В., Оцарев И. В., Бурханов А. И., Нестеров В. Н., Сигов А. С., Воротилов К. А. // *Изв. РАН Сер. физ. М.: Наука*. 2000. Т. 64. № 6. С. 1239—1241.

УДК 621.397 + 628.9.03

**И. И. Литвак**, д-р техн. наук, проф., МИЭМ,  
**Н. В. Пахомов**, канд. техн. наук,  
Секция прикладных проблем  
при Президиуме РАН

## СРЕДСТВА ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ НА БАЗЕ ОРГАНИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

*Излагаются новые данные о состоянии разработок и применении перспективных средств отображения информации с использованием органических электролюминесцентных приборов. Материал статьи базируется на зарубежных публикациях и докладах 2000—2001 гг.*

Внимание заказчиков средств отображения информации для подвижных комплексов (включая заказчиков авионики) в последние годы начали привлекать органические светоизлучающие электролюминесцентные приборы — органический электролюминесцентный дисплей (OLED).

Основные требования к современным дисплеям такого назначения могут быть кратко сформулированы следующим образом:

- высокая яркость и высокая контрастность;
- большее число цветов (полноцветное изображение);
- высокая разрешающая способность;
- плоская тонкая конструкция;

- малая масса;
- малое потребление мощности;
- низкая цена.

Часто эти требования не могут быть выполнены в совокупности. Так, не существует дисплея на плоской панели (FPD), который являлся бы подходящим для подвижных комплексов и полностью выполнял все требования [1].

Хотя вакуумно-люминесцентные (VFD), электролюминесцентные (EL) и пассивные матричные жидкокристаллические индикаторы (LCD) уже нашли применение в приборных панелях самолетов, в автомобильных радиоприемниках и приборных щитках, однако эти плоские дисплеи (FPD) не способны удовлетворить жестким и разнообразным требованиям к авиационной электронике, к средствам отображения информации в наземной военной технике [1—3].

Информация последних лет позволяет с достаточными основаниями предполагать [4—9], что OLED-технология, появившаяся как ведущая FPD-технология следующего поколения, сможет соответствовать этим строгим требованиям. Приборы OLED — яркие, светоизлучающие, полноцветные приборы, которые обеспечивают малую потребляемую мощность, широкий угол обзора, хорошую контрастность и, соответственно, точность и скорость зрительного восприятия. Кроме того, приборы OLED компактны и легки, тепло- и холодоустойчивы, выдерживают значительные механические нагрузки, имеют достаточный срок службы.

## Основные параметры OLED

Органический электролюминесцентный дисплей — OLED — это монолитный, тонкопленочный, полупроводниковый прибор, который излучает свет, когда к нему приложено напряжение (рис. 1).

OLED состоит из ряда тонких органических пленок, которые заключены между двумя тонкопленочными проводниками. Приборы OLED работают при низких напряжениях (3–10 В), имеют очень широкий угол обзора ( $> 160^\circ$ ) и малое время срабатывания — приблизительно 10 мкс.

Цвет, эффективность и интенсивность излучения приборов OLED зависят от использованных органических материалов, применяя которые, можно добиться широкого многообразия цветов. Сегодня основное внимание разработчиков приборов OLED направлено на создание материалов для полноцветных (красного, зеленого и синего) приборов OLED (рис. 2, см. четвертую сторону обложки).

Имеются два класса органических материалов, которые используются в приборах OLED — микромолекулы и полимеры.

Началом исследования OLED принято считать публикацию С. W. Tang и S. A. Van Slyke в 1987 г., в которой они обосновали выбор люминесцентных материалов и предложили варианты структуры прибора. Одновременно они продемонстрировали первый эффективный прибор OLED, применяя молекулярно взвешенный органический материал, обычно известный как  $Alq_3$  (aluminium tris-3-hydroquinoline). Чтобы расширить спектральные характеристики, повысить эффективность прибора и срок службы, в структуру прибора были добавлены флуоресцентные красители. В результате максимальная внутренняя квантовая эффективность составляла ~25 %. В принципе использование красителей потенциально обеспечивает 100 %-ную внутреннюю квантовую эффективность.

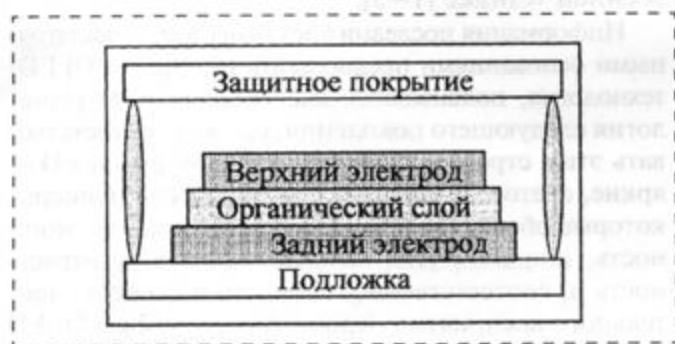


Рис. 1. Структура органического светоизлучающего прибора (OLED)

Все последующие годы параллельно велись работы по обоим направлениям создания OLED. В то время как пользователь не мог бы отличить полимерный прибор OLED (PLED) от прибора OLED с микромолекулами (sm-OLED), эти две системы имеют несколько различий.

Сегодня приборы sm-OLED опережают приборы PLED по эффективности и сроку службы. Тем не менее прогресс для обоих приборов огромен. Недавно эффективность лучших приборов sm-OLED и PLED более чем удвоилась.

Опубликованы значения эффективности желто-зеленых приборов PLED (20 лм/Вт) и зеленых флуоресцентных приборов sm-OLED ( $> 40$  лм/Вт). Эффективность 4 лм/Вт (МКО 0,67; 0,32) и 1,0 лм/Вт (МКО 0,65; 0,35) была достигнута для флуоресцентного и флуоресцентного красного приборов sm-OLED соответственно, в то же время у красного прибора PLED эффективность составляла до 1,7 лм/Вт (МКО 0,69; 0,31). Для синего излучения эффективность 6 лм/Вт (МКО 0,16; 0,23) получена для флуоресцентного излучения, а для прибора PLED лишь 1,4 лм/Вт.

OLED — тонкопленочное устройство со светящейся поверхностью, состоящей из множества одновременно излучающих свет ячеек на одной подложке. При изготовлении OLED имеется возможность применять широкий диапазон процессов формирования этой структуры, например, ячейки могут быть изготовлены либо методом напыления, либо методом струйной печати. Для создания дисплея с произвольным структурированием можно применить обычную литографию. Другими словами, OLED имеют значительные преимущества в технологии формирования структуры.

Приборы OLED излучают равномерно и без мелькания, яркость составляет от нескольких единиц кандел на квадратный метр (для ночной работы) до очень высоких значений ( $> 100,000$  кд/м<sup>2</sup>), причем их яркость может регулироваться в очень широком динамическом диапазоне. Так как срок службы OLED обратно пропорционален яркости, для приборов рекомендуется работа при более умеренных уровнях яркости. Достигнутыми сегодня результатами считаются сроки службы по спаду яркости в 2 раза (до 5,000–10,000 ч при средней яркости 100 кд/м<sup>2</sup>).

Чтобы обеспечить хорошую читаемость информации при прямом солнечном свете, следует увеличивать контраст, а не яркость приборов. Чтобы добиться этого, отражающая способность дисплея должна быть управляемой. Приборы OLED имеют очень хорошую контрастность. Например, стандартный прибор OLED (рис. 3, а, см. четвертую сторону обложки), имеющий круговой поляризатор с антибликовым покрытием, имеет контраст

свыше 300:1 при уровне освещенности 500 лк, которая считается нормальной для наземного транспорта. В условиях прямого солнечного света (50,000 лк), когда контраст 2:1 является минимально допустимым для удобочитаемости, зеленый прибор PM-OLED с круговым поляризатором и фильтром, имеющим антибликовое покрытие, обладает контрастом 6:1 при яркости 370 кд/м<sup>2</sup>.

Повысить контраст удается в просветных приборах OLED (так называемых приборах с верхним излучением — TOLED). Как показано на рис. 3, б (см. четвертую сторону обложки) TOLED, структура с полупрозрачным катодом, является менее отражающей, чем стандартные приборы OLED. Дополняя прибор TOLED черным поглотителем (абсорбентом) или структурой типа черного слоя по технологии, в которой используется явление интерференции света, можно добиться того, что отражающая способность еще больше снижается для повышения контраста (рис. 3, в, см. четвертую сторону обложки). Такая конструкция прибора устраняет потребность в круговом поляризаторе, вследствие чего также улучшаются параметры по мощности потребления, сроку службы и стоимости.

Кроме того, возможен вариант прибора TOLED с расположением излучающего слоя на непрозрачной подложке (рис. 3, г, см. четвертую сторону обложки), что позволяет получить больший угол обзора, лучшую читаемость и меньшую мощность потребления, чем у прибора OLED с излучением через подложку.

Приборы TOLED, которые имеют коэффициент пропускания 70–85 % в выключенном состоянии, могут быть применены для воспроизведения информации на лобовом стекле. Требуемая для такого использования яркость в настоящее время недостижима, но ведущиеся разработки делают такую возможность реальной в ближайшей перспективе. Одновременно следует изучать возможность использования приборов TOLED в качестве накладываемых на другие системы отображения или для формирования фона.

Транспортные дисплеи также должны работать в широком диапазоне рабочих температур — от температур ниже нуля до температур, которые превышают 80 °С. В то время, как для жидкокристаллических индикаторов (ЖКИ) воздействие низких температур оказывается неблагоприятным и обычно требуется использование подогрева подложки, приборы OLED хорошо работают при очень низких температурах, даже при температуре –40 °С. Для быстрого начала работы с индикатором в холодных условиях это особенно важно.

При высоких температурах приборы OLED имеют некоторые ограничения. Обычно такие материалы имеют  $T_g = 90\div 95$  °С и допустимую рабочую

температуру 70 °С. В стадии разработки находятся материалы с более высокой температурой  $T_g$ , чтобы расширить диапазон эффективной рабочей температуры и температуры хранения.

Прибор OLED — это тонкий и легкий прибор. В то время как типичная толщина маленького поликремниевого активно-матричного ЖКИ составляет 6 мм, а толщина вакуумно-люминесцентного индикатора 16–20 мм, прибор OLED, используя стекло толщиной 0,7 мм, будет иметь толщину, не намного большую 1,4 мм.

В отличие от ЖКИ с промежутками между ячейками, в которых искажаются изображения из-за контактного давления и перемещаются от чрезмерной вибрации прослоек между ячейками, приборы OLED относительно нечувствительны к сжатию и вибрации из-за монолитной, твердотельной конструкции.

Ныне основные усилия разработчиков OLED направляются на уменьшение дифференциального старения, повышение чистоты цвета и увеличение срока службы полноцветных приборов. Отдельная проблема — получение эффективного белого цвета либо путем разработки новых материалов, либо методом смешения цветов. Следует также иметь в виду, что для OLED требуется совершенная герметизация, потому что органические флуоресцентные материалы чрезвычайно чувствительны к влажности.

При последующем развитии фосфоресцентных материалов приборы OLED могут стать не только эффективным средством отображения, но и тонкопленочным источником света, заменяя многочисленные дискретные лампы накаливания и дорогие большие неорганические светодиоды.

## Управление приборами OLED

Самостоятельное направление исследований — разработка методов управления и специальных интегральных схем для OLED приборов. Совершенствование техники сделало сегодня возможным практическое применение двух вариантов построения схем управления OLED приборами — с пассивными и активными матрицами [5–9].

OLED приборы с пассивными схемами управления имеют потенциальную возможность отображать полноцветные подвижные изображения с превосходным качеством. Это демонстрировалось на многих прототипах среднего размера. Однако при создании маленьких цветных панелей с высоким разрешением и при использовании пассивной схемы управления возникают значительные трудности.

Во-первых, при пассивном управлении импульсный электрический ток подводится к каждому пикселю. Амплитуда этих импульсов становится очень высокой, так как число катодных шин

увеличивается по мере увеличения разрешения панелей и параметры светоизлучающих ячеек быстро ухудшаются.

Второй проблемой является электрическая разводка в индикаторном модуле. Между каждым пикселем и схемами управления должно быть множество шин. Поскольку к каждому пикселю должен поступать электрический ток, необходимо уменьшить электрическое сопротивление этих шин так, чтобы потери энергии в соединениях были минимизированы. Для реализации этого соединительные проводники не должны быть слишком длинными или слишком тонкими, и это может явиться большим препятствием при создании малогабаритного пассивного устройства.

Использование активно-матричной технологии для управления тонкопленочными транзисторами на низкотемпературном поликристаллическом кремнии (LTPS) решает все эти проблемы. При активном управлении электрический ток, подаваемый к каждому пикселю, как правило, постоянный. В результате улучшаются эксплуатационные условия для каждой светоизлучающей ячейки и увеличивается срок службы ячейки. Шины могут быть короткими при активном управлении, так что потери мощности уменьшаются.

Поскольку низкотемпературный поликристаллический кремний допускает изготовление схем управления непосредственно на стеклянной подложке индикаторной панели, длины соединительных проводников, а следовательно, и потери мощности уменьшаются, имеется меньшее число проводников, соединяющих панель с главной системой, и стоимость монтажных работ более низкая. Дальнейшее развитие активно-матричной технологии OLED (AMЭЛ) очень важно для повышения значимости OLED приборов и расширения области их применения.

Использование OLED приборов, работающих от аккумуляторов, требует применения маломощных активно-матричных схем управления. Так как мощность, рассеиваемая AMЭЛ устройствами, прямо пропорциональна квадрату приложенного переменного напряжения, то снижение напряжения приведет к значительному уменьшению мощности. К тому же, если уменьшить высокое напряжение на интегральных схемах, то можно создавать более высокоплотные активные матрицы, а вследствие более низких емкостей дополнительно уменьшится рассеиваемая мощность.

### Применение приборов OLED

В 1994 г. был описан первый прототип AMЭЛ дисплея с высоким разрешением — матрица

1280 × 1024 из пикселей размером 24 мкм. В 1997 г. для военного и промышленного применения в качестве наשלемного дисплея были разработаны образцы монохромных AMЭЛ дисплеев стандарта VGA, демонстрирующие высокую яркость, низкую потребляемую мощность и хорошую стабильность. Годом позже фирма *Planar* впервые представила на выставке образец полноцветного AMЭЛ дисплея стандарта VGA, в котором применялся белый люминофор с фильтрацией излучения [3].

Первый OLED прибор, представленный на рынок, был пассивно адресованной матричной панелью, имеющей 256 × 64 точек (рис. 4, см. четвертую сторону обложки). Он использовался для автомобильной звуковой системы и имел следующие характеристики: яркость 100 кд/м<sup>2</sup>; контрастное отношение 100:1; угол обзора 170°; диапазон рабочих температур: от -40 до +85 °С.

В 1997 г. фирмы *Pioneer Corp.* и *Tohoku Pioneer Corp.* совместно установили поточные линии для создания OLED приборов. Был разработан и начал продаваться зеленый монохромный дисплей с точечной матрицей для автомобильной звуковой системы. Так впервые OLED прибор нашел практическое применение. В 1999 г. та же самая группа разработала цветной матричный дисплей с четырьмя различными цветами, представила его на всемирный рынок и начала массовое производство.

Корпорация *Tohoku Pioneer* в 1990 г. запустила на предприятии *Yonezawa* массовое производство цветных пассивно-матричных OLED панелей для автомобильных звуковых систем. С тех пор производство постоянно увеличивается. Общие отгрузки составляют более 1,2 млн штук для применения в автомобилях и 1 млн штук для применения в мобильных телефонах [4].

Широкая цветовая гамма — наиболее важная проблема в расширении применения. Исследовательская группа корпорации *Tohoku Pioneer* активно разрабатывает 18-разрядные OLED приборы, используя тонкопленочные транзисторы "монокристалл кремния" (CGSI). Эта группа разработала некоторые опытные образцы, предназначенные для мобильных телефонов третьего поколения — двухдюймовое устройство, имеющее 176 × 192 точек (рис. 5, см. четвертую сторону обложки) и трехдюймовое устройство, имеющее 320 × 320 точек. Эти образцы превосходят жидкокристаллические (ЖК) панели для мобильных устройств по качеству изображения, толщине и массе.

Корпорация *Tohoku Pioneer* в 2002 г. начинает массовое производство цветных 18-разрядных AMЭЛ дисплеев. Как часть этого плана лабораторией *Semiconductor Energy Laboratory (SEL)*, корпорацией

*Sharp* и корпорацией *Tohoku Pioneer* была учреждена компания, названная *ELDis*, для производства TFT подложек исключительно для применения в OLED. Создание чистой комнаты уже началось в компании *ELDis*, а установка необходимого оборудования для производства CGSI-TFT в чистой комнате начнется в начале 2002 г. Образцы подложек TFT запланировано отправить корпорации *Tohoku Pioneer* летом 2002 г. Компания установит линию напыления исключительно для полноцветных панелей на предприятии *Yonezawa* и поставит цветные панели на рынок к IV кварталу 2002 г.

По планам фирмы *Tohoku Pioneer* сначала будут запущены в серийное производство 2–4-дюймовых АМЭЛ дисплеев, которые будут применяться в автомобильных звуковых системах и в портативных устройствах типа мобильных телефонов, персональных цифровых помощников (PDA) и цифровых видеокамер. Затем при успешной торговле малыми OLED устройствами фирма планирует производить панели среднего размера для портативных ЭВМ и видеомониторов.

Многоцветная панель с тремя различными цветами используется в мобильном телефоне TimePort фирмы *Motorola*, который получил хорошую репутацию на рынке США в прошлом году. Объединение тонкопленочной технологии и управляющей схемы для активных матриц позволило получить новые миниатюрные дисплеи с высокой разрешающей способностью в 1000 линий на дюйм. Эти дисплеи показали высокие визуальные параметры при компактных размерах, что является идеальным для производства нашиваемых дисплеев.

Представляют значительный интерес разрабатываемые фирмой UDC OLED приборы на гибких подложках (рис. 6, см. четвертую сторону обложки). Этот дисплей (FOLED) на пассивной матрице 128 × 64 пикселя (размер пикселя 400 × 500 мкм), имеющий яркость 100 кд/м<sup>2</sup>, выполнен на стандартной жароупорной пленке толщиной 0,18 мм из полиэтилентерефталата (PET), является ультратонким и имеет массу, существенно меньшую, чем у любого дисплея с аналогичными параметрами.

Приборы FOLED еще более прочные, чем обычные OLED приборы, и, кроме того, допускают изгиб с радиусом кривизны, меньшим 1 см. В ближайшее время будут разработаны изделия, повторяющие форму сложных поверхностей. Это означает, что использование прибора FOLED открывает совершенно новые возможности при проектировании панели транспортного средства. Экран может быть установлен в пространство, рань-

ше недоступное для дисплеев на плоских панелях, например, интегрировать дисплей FOLED в изогнутую приборную доску, на внутреннюю облицовку боковых панелей и потолка и, возможно, на ветровое стекло, что обеспечит одновременно удобство и безопасность для оператора.

В числе пока нерешенных вопросов остаются сложные задачи по защите приборов OLED на пластмассе от воздействия влаги и кислорода, поскольку новые защитные материалы и методы герметизации еще находятся в стадии разработки.

\* \* \*

Технология OLED приборов еще молода и имеет намного более короткую историю, чем ЖК дисплеи. Следовательно, инфраструктура производства, включая материалы, компоненты, инструментальные средства производства, контрольное оборудование и интегральные схемы драйверов, мало развита. Также имеется мало опыта по использованию OLED приборов в других применениях, помимо автомобильных звуковых систем и сотовых телефонов. Кроме того, OLED приборы все еще не достаточно хорошо приняты на рынке.

Технология OLED потенциально имеет значительное преимущество по стоимости по сравнению с технологией ЖКИ. Приборы OLED значительно меньше насыщены материалами, они требуют существенно меньшего числа технологических операций и поэтому должны требовать меньших капиталовложений. Кроме того, при производстве OLED приборов будут использоваться части инфраструктуры ЖКИ, что сократит время на организацию выпуска.

#### Список литературы

1. **International Symposium SID // Digest of Technical Papers.** Vol. XXX. San-Jose, California. May 14–17, 1999. P. 1210.
2. **International Symposium SID // Digest of Technical Papers.** Vol. XXXI. Long Beach, California. May 16–18, 2000. P. 1297.
3. **International Symposium SID. Digest of Technical Papers.** Vol. XXXII. San-Jose, California. June 4–8, 2001, P. 1245.
4. **Janice K. Mahon.** History and Status of Organic Light Emitting Device (OLED) Technology for Vehicular Applications. Intern. Symp. SID // Digest of Technical Papers. Vol. XXXII. San-Jose, California. June 4–8, 2001.
5. **SID Seminar Lecture Notes.** Vol. I. San-Jose, California. May 17, 1999. P. 487.
6. **SID Seminar Lecture Notes.** Vol. II. San-Jose, California. May 21, 1999. P. 453.
7. **SID Seminar Lecture Notes.** Vol. I. Long Beach, California. May 15, 2000. P. 511.
8. **SID Seminar Lecture Notes.** Vol. I. San-Jose, California. June 4, 2001. P. 697.
9. **SID Seminar Lecture Notes.** Vol. II. San-Jose, California. June 8, 2001. P. 319.

УДК 621.382.3

**И. И. Абрамов**, д-р физ.-мат. наук,  
**С. А. Игнатенко**, **Е. Г. Новик**, канд. физ.-мат. наук,  
 Учреждение образования "Белорусский  
 государственный университет информатики  
 и радиоэлектроники" (г. Минск)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХОСТРОВКОВЫХ ОДНОЭЛЕКТРОННЫХ СТРУКТУР\*

*Рассмотрена разработанная двумерная численная модель двухостровкового одноэлектронного транзистора, позволяющая рассчитывать его электрические характеристики в зависимости от конструктивно-технологических и электрофизических параметров прибора. С ее использованием можно получить хорошее согласование с экспериментальными данными. Модель включена в подсистему моделирования одноэлектронных приборов SET-NANODEV.*

### Введение

Актуальное направление нанoeлектроники — разработка и исследование приборных структур, функционирующих на эффектах кулоновской блокады и коррелированного одноэлектронного туннелирования [1]. Большое внимание в настоящее время уделяется одноэлектронным транзисторам ввиду перспективности их использования для создания различных устройств, включая ультрамалые интегральные схемы более высокой степени интеграции по сравнению с известными [2, 3]. В частности, для создания элементов памяти наиболее целесообразно использование многоостровковых структур, так как они менее чувствительны к паразитному эффекту котуннелирования [4] и при фиксации напряжения в них проявляется как временная, так и пространственная корреляция.

Традиционно для моделирования цепочек и матриц туннельных переходов [2] используются модели полуклассического приближения, базирующиеся либо на решении основного уравнения (master equation) [5], либо на методе Монте-Карло [6]. Они позволяют рассчитывать характеристики одноэлектронных приборов на основе их эквива-

\* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Республиканских программ научных исследований: "Электроника", "Нанoeлектроника" и гранта Министерства образования Республики Беларусь.

лентных схем с учетом дискретности туннельных событий. К сожалению, в данных моделях в качестве обязательных параметров согласования с экспериментальными данными используются сопротивления и емкости туннельных переходов. В результате утрачивается связь модели с параметрами конструкции и материалов прибора, что затрудняет ее использование в процессе его разработки и исследования.

В работах [3, 7–9] была предложена двумерная численная модель металлического одноэлектронного транзистора с одним островком в рамках полуклассического приближения, позволяющая рассчитывать электрические характеристики прибора в зависимости от конструктивно-технологических и электрофизических параметров структуры, т. е. лишенная отмеченного недостатка. Модель так же, как и другие модели полуклассического приближения, требует приемлемых затрат вычислительных ресурсов персональных ЭВМ типа Pentium [3].

Цель данной статьи — распространение разработанного подхода на случаи многоостровковых одноэлектронных структур. При этом также иллюстрируется возможность учета влияния температурного фактора.

### Модель

Разработанная модель предназначена для расчета вольт-амперных характеристик (ВАХ) многоостровковых металлических одноэлектронных структур. В качестве примера рассмотрим прибор с двумя островками (рис. 1). Исходными в модели являются геометрические (указаны на рис. 1) и электрофизические параметры, а также управляющие воздействия: напряжения истока, стока и затвора; температура  $T$ .

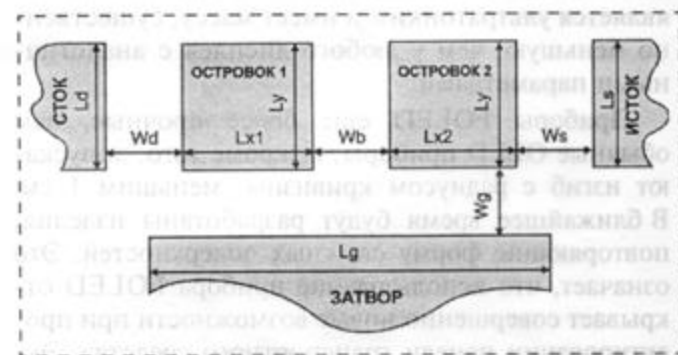


Рис. 1. Структура двухостровкового одноэлектронного транзистора



Предложенная модель основана на численном решении двумерного уравнения Пуассона (влияние магнитного поля не учитывается), а именно [3, 9]:

$$\nabla \varepsilon \nabla \varphi(x, y) = -q_M,$$

где  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость;  $\varphi$  — электростатический потенциал;  $x, y$  — координаты;  $q_M$  — объемная плотность зарядов, включающая плотность носителей заряда  $q_i$ , участвующих непосредственно в туннелировании, и плотность фонового заряда  $q_0$ . Заряд в диэлектрике не учитывается.

Далее осуществляется переход от непрерывной формы уравнения Пуассона (1) к его дискретной аппроксимации для двумерного случая. В качестве краевых условий выбирались граничные условия Дирихле на контактах и условия Неймана на свободных границах. Конечно-разностная аппроксимация уравнения Пуассона осуществляется на основе интегроинтерполяционного подхода Тихонова—Самарского [8] в сочетании с рядом физических предположений. Возможные приближения для усредненной плотности избыточных зарядов на островке подробно рассмотрены в [3, 9]. В результате решение уравнения Пуассона сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений, которое проводится с помощью метода матричной прогонки. Таким образом, получается распределение потенциала в структуре в зависимости от геометрических, электрофизических параметров структуры и управляющих воздействий.

Сопротивления туннельных переходов определяются по формуле [10, 11]:

$$R = \frac{\hbar}{2\pi e^2 D_1 D_2 \tau}, \quad (2)$$

где  $\hbar$  — приведенная постоянная Планка;  $D_1, D_2$  — плотности состояний с одной и с другой стороны потенциального барьера;  $e$  — заряд электрона;  $\tau$  — вероятность переноса носителей через переход, которая находится из соотношения [3]

$$\tau = \exp\left(-\frac{2}{\hbar} \int \sqrt{2m\phi(x)} dx\right), \quad (3)$$

где  $m$  — эффективная масса электрона;  $\phi(x)$  — высота потенциального барьера.

Ток, проходящий через туннельный барьер, определяется согласно выражению [1]:

$$I = \frac{V_{eff}}{R} \left[1 - \exp\left(-\frac{eV_{eff}}{k_B T}\right)\right]^{-1}, \quad (4)$$

где 
$$V_{eff} = \frac{V_i + V_f}{2}; \quad (5)$$

$V_i$  и  $V_f$  — напряжения до туннелирования электрона и после соответственно;  $k_B$  — постоянная Больцмана.

Для расчета ВАХ одноэлектронной структуры использовалось основное уравнение [1], но записанное не для скоростей туннелирования, а непосредственно для токов через отдельные туннельные переходы. Для двухостровковой структуры оно принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma(n1, n2)}{\partial t} = & I_{n1-1, n2 \rightarrow n1, n2} \sigma(n1-1, n2) + \\ & + I_{n1, n2-1 \rightarrow n1, n2} \sigma(n1, n2-1) + \\ & + I_{n1+1, n2 \rightarrow n1, n2} \sigma(n1+1, n2) + \\ & + I_{n1, n2+1 \rightarrow n1, n2} \sigma(n1, n2+1) - \\ & - (I_{n1, n2 \rightarrow n1+1, n2} + I_{n1, n2 \rightarrow n1, n2+1} + \\ & + I_{n1, n2 \rightarrow n1-1, n2} + I_{n1, n2 \rightarrow n1, n2-1}) \sigma(n1, n2). \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь  $\sigma(n1, n2)$  — вероятность нахождения избыточных носителей на островках;  $n1, n2$  — число избыточных носителей на первом и втором островках соответственно;  $I_{n1-1, n2 \rightarrow n1, n2}$  — сумма токов через туннельные переходы при изменении числа носителей на первом островке  $n1-1 \rightarrow n1$ . В более общей матричной форме для многоостровковых одноэлектронных структур можем записать:

$$\dot{\sigma} = A\sigma(n), \quad (7)$$

где

$$A_{\alpha, \beta} = \begin{cases} I(\alpha \rightarrow \beta) & \text{для } \alpha \neq \beta; \\ -\sum_{\gamma} I(\alpha \rightarrow \gamma) & \text{для } \alpha = \beta. \end{cases}$$

Здесь  $A_{\alpha, \beta}$  — коэффициенты матрицы  $A$ .

Заметим, что пространство состояний  $\sigma(n1, n2)$  двумерное, а матрица коэффициентов — трехмерная. Для решения уравнения (6) необходимо преобразовать пространство состояний в вектор, а матрицу коэффициентов — в двухмерную.

В стационарном случае левые части уравнений (6) и (7) равны нулю. Для нахождения нетривиального решения стационарного уравнения используется итерационный метод Зейделя [12]. Решением (6) являются вероятности нахождения определенных комбинаций носителей на островках  $\sigma(n1, n2)$ . Условие нормировки имеет вид

$$\sum_{n1=-\infty}^{+\infty} \sum_{n2=-\infty}^{+\infty} \sigma(n1, n2) = 1. \quad (8)$$

Общий ток через структуру вычисляется из соотношения

$$I = \sum_{n1} \sum_{n2} \sigma(n1, n2) (I^+(n1, n2) - I^-(n1, n2)), \quad (9)$$

где  $I^+(n1, n2)$ ,  $I^-(n1, n2)$  — токи через туннельный переход в прямом и обратном направлениях соответственно.

Критерием правильности решения основного уравнения является равенство общих токов через все туннельные переходы с определенной степенью точности.

Предложенная модель реализована в программе, которая была включена в подсистему расчета одноэлектронных приборов и структур SET-NANODEV системы моделирования нанoeлектронных приборов на эффектах одноэлектронного, резонансного туннелирования и квантовой интерференции NANODEV [3].

### Результаты моделирования

В целях проверки адекватности разработанной модели проводилось прежде всего сравнение результатов расчета с экспериментальными данными. В качестве тестовой была выбрана двухостровковая одноэлектронная цепочка, образующаяся в слоистом материале  $\text{PbBa}_2(\text{Ca}_{0,8}\text{Y}_{0,2})\text{Cu}_2\text{O}_7$  [13]. Эксперимент был проведен при температуре  $T = 9,8$  К. Результаты моделирования представлены на рис. 2. Для наглядности теоретические данные сдвинуты на рисунке вверх на 1 нА, так как практически полностью совпадают с экспериментальными результатами. При этом аппроксимация усредненной плотности избыточных зарядов на островках основывалась на приближении (6) работы [9] с постоянным коэффициентом  $k_f$ . Для исключения влияния затвора на ВАХ напряжение на нем задавалось равным нулю, а расстояние от островков до затвора бралось достаточно большим.

На рис. 3 приведены результаты расчета ВАХ двухостровковых одноэлектронных транзисторов с

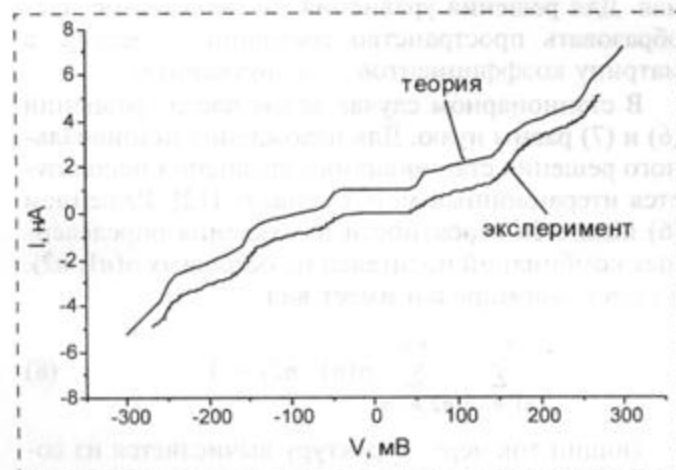


Рис. 2. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными (теоретические данные сдвинуты относительно экспериментальных вверх на 1 нА)

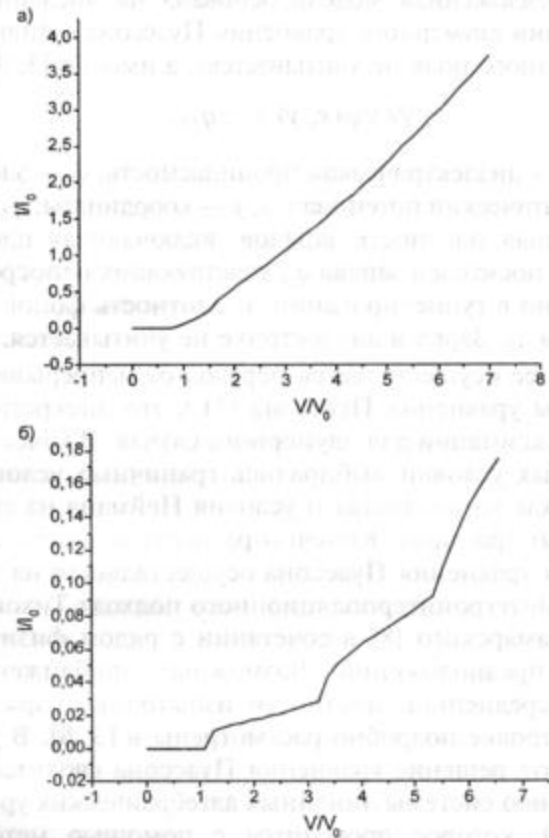


Рис. 3. ВАХ двухостровковых одноэлектронных транзисторов с равными (а) и различными (б) размерами туннельных переходов

равными (рис. 3, а) и различными (рис. 3, б) размерами туннельных переходов. Для удобства сравнения токи и напряжения взяты в относительных единицах ( $V_0$  — пороговое напряжение первого туннельного перехода;  $I_0$  — ток, протекающий при данном напряжении через переход). Кулоновская блокада хорошо видна на обоих рисунках. При несимметричных переходах появляется кулоновская лестница. У структуры, ВАХ которой приведена на рис. 3, б,  $W_s$  в 1,5 раза больше, чем  $W_b$  (равна  $W_d$ ). Как видно из рисунка, ток, проходящий через структуру, стал меньше. Это связано с тем, что с увеличением ширины туннельного перехода его сопротивление увеличивается, а соответствующий ток уменьшается. Данные закономерности хорошо согласуются с результатами, получаемыми для одноостровковых одноэлектронных транзисторов [3, 7].

Более того, предложенная модель правильно описывает влияние температуры на ВАХ двухостровкового одноэлектронного транзистора. Так, на рис. 4 приведены результаты моделирования для четырех температур  $T$ . Как из него следует, при повышении температуры происходит "размывание" кулоновской лестницы, что полностью согласуется с известными экспериментальными данными для

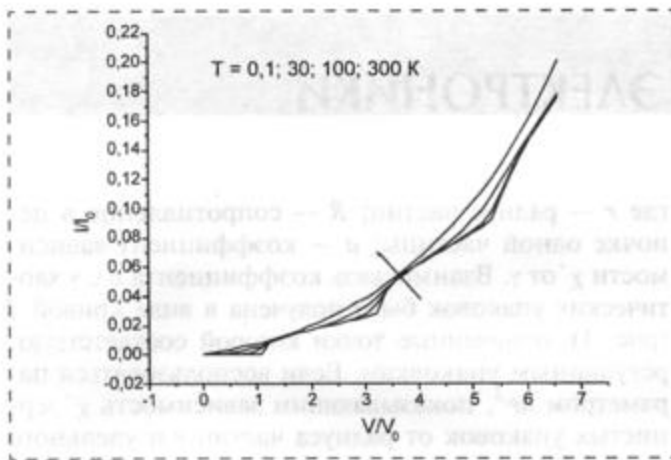


Рис. 4. Влияние температуры на ВАХ

одноэлектронных транзисторов. При нормальной температуре лестница для исследуемой структуры практически отсутствует. Стрелкой на рисунке указано направление увеличения температуры.

Таким образом, разработанная модель позволяет адекватно описывать основные закономерности поведения двухостровковых одноэлектронных структур.

\*\*\*

В работе в качестве основного было выбрано полуклассическое приближение, позволяющее, в отличие от квантовомеханического подхода, на практике моделировать достаточно сложные многотуннельные структуры [14]. В рамках данного приближения разработана модель двухостровкового одноэлектронного транзистора, с помощью которой можно исследовать зависимости ВАХ от конструктивно-технологических, электрофизических параметров структуры, а также от рабочей температуры  $T$ .

Показано, что модель позволяет получить хорошее согласование с экспериментальными данными.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность А. Н. Короткову за ряд полезных замечаний по модели, описанной в данной статье.

#### Список литературы

1. Single charge tunneling: Coulomb blockade phenomena in nanostructures / ed. by H. Grabert, M. H. Devoret. New-York, Plenum, 1992. 336 p.
2. Абрамов И. И., Новик Е. Г. Классификация приборных структур одноэлектронной // ФТП, 1999. 33 (11). С. 1388—1394.
3. Абрамов И. И., Новик Е. Г. Численное моделирование металлических одноэлектронных транзисторов. Минск: Бестпринт, 2000. 164 с.
4. Nakazato K., Blaikie R. T., Ahmed H. Single-electron memory // J. Appl. Phys. 1994. 75 (10). P. 5123—5134.
5. Amman M., Mullen K., Ben-Jacob E. The charge-effect transistor // J. Appl. Phys. 1989. 65 (1). P. 339—346.
6. Бахвалов Н. С., Казача Г. С., Лихарев К. К., Сердюкова С. И. Одноэлектронные солитоны в одномерных туннельных структурах // ЖЭТФ. 1989. 95 (3). С. 1010—1021.
7. Абрамов И. И., Новик Е. Г. Характеристики металлических одноэлектронных транзисторов на различных материалах // ФТП. 2000. 34 (8). С. 1014—1019.
8. Абрамов И. И., Новик Е. Г. Двумерная численная модель одноэлектронного транзистора // Микроэлектроника. 2000. 29 (3). С. 197—201.
9. Абрамов И. И., Новик Е. Г. Учет фонового заряда на "островке" при моделировании одноэлектронных транзисторов // ФТА. 2001. 35 (4). С. 489—491.
10. Simmons J. G. Generalized formula for the electric tunnel effect between similar electrodes separated by a thin insulating film // J. Appl. Phys. 1963. 34. P. 1793—1803.
11. Fukui H., Fujishima M., Hoh K. Single-electron transistor in silicon-on-insulator with Schottky-contact tunnel barriers // Jpn. J. Appl. Phys. 1997. 36. P. 4147—4170.
12. Вержбицкий В. М. Численные методы (линейная алгебра и нелинейные уравнения). Москва: Высшая школа, 2000. 266 с.
13. Miller T. G., Reifengerger R. Three-tunnel-capacitor model for single-electron tunneling in layered thin films // Phys. Rev. B. 1994. 50. P. 3342—3349.
14. Fonseca L. R. C., Korotkov A. N., Likharev K. K., Odintsov A. A. A numerical study of the dynamics and statistics of single electron system // J. Appl. Phys. 1995. 78 (5). P. 3238—3251.

## НОВЫЕ КНИГИ

### Абрамов И. И. Моделирование физических процессов в элементах кремниевых интегральных микросхем. Минск: БГУ, 1999. 189 с.

В монографии описывается методология многомерного моделирования физических процессов в элементах и фрагментах кремниевых сверхбольших и ультрабольших интегральных схем (СБИС и УБИС). В частности, приводятся непрерывные модели диффузионно-дрейфового приближения, допускающие исследование влияния эффектов сильного легирования, саморазогрева и температуры окружающей среды на процессы, протекающие в структурах. Излагаются методы построения и реализации из непрерывных моделей дискретных физико-топологических моделей элементов и фрагментов. Возможности предложенной методологии иллюстрируются на примерах многомерного моделирования физических процессов в характерных активных структурах СБИС и УБИС, в том числе в нелинейных режимах работы, строгая теория которых не была создана. Монография предназначена для специалистов в области физики полупроводниковых приборов и микроэлектроники, а также может быть полезна инженерно-техническим работникам, занимающимся автоматизацией проектирования СБИС и УБИС, аспирантам и студентам старших курсов соответствующих специальностей.

Дополнительную информацию можно получить на сайте: [www.nanodev.org](http://www.nanodev.org)  
и по e-mail: [nanodev@bsuir.edu.by](mailto:nanodev@bsuir.edu.by)

# В МИРЕ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 668.395:678.046.32:537.311

Г. В. Козлов,  
Московский государственный технологический  
университет "Станкин"

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ В ПОЛИМЕРНЫХ ДИСПЕРСИОННЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ КОНТАКТОВ

*Показана зависимость электропроводности зернистых упаковок от их плотности и контактных сопротивлений. В полимерных наполненных композициях механические и электрические контакты формируются благодаря усадке шивки связующих, а их электропроводность обусловлена физико-механическими свойствами компонентов, значениями усадки и скорости шивки связующих, а также давлением окружающей среды.*

Электропроводящие дисперсные полимерные системы (ЭДПС) находят широкое применение в самых современных отраслях промышленности. Например, в электронной промышленности они используются в виде металлонаполненных полимерных клеев (МПК) и проводящих или резистивных полимерных толстых пленок (ПТП) [1, 2]. Такие ЭДПС получают из высококонцентрированных суспензий, содержащих в качестве дисперсионной среды (ДС) жидкие смолы — олигомеры (простые или модифицированные фенольные, эпоксидные, полиэфирные и др.) или их растворы и порошки металлов, графита или технических углеродов в качестве дисперсной фазы (ДФ).

В работах [3, 4] показано, что частицы ДФ образуют в суспензиях физически устойчивые каркасы, ответственные за проводимость. Для предотвращения расслаивания и потери проводимости объемную долю ДФ ( $\gamma$ ) берут достаточно большой (от 0,3 до 0,6), вследствие чего указанные каркасы заполняют весь объем ЭДПС, дисперсионная среда которых находится в межчастичных участках каркасов. Показано также [3], что удельная проводимость ЭДПС ( $\chi'$ ), как каркасов из моносферических проводящих частиц ДФ, может быть вычислена по следующей формуле:

$$\chi' = a/Rr, \quad (1)$$

где  $r$  — радиус частиц;  $R$  — сопротивление в цепочке одной частицы;  $a$  — коэффициент зависимости  $\chi'$  от  $\gamma$ . Взаимосвязь коэффициента  $a$  с  $\gamma$  хаотических упаковок была получена в виде кривой 1 (рис. 1), отмеченные точки которой соответствуют регулярным упаковкам. Если воспользоваться параметром  $\pi r^3$ , показывающим зависимость  $\chi'$  зернистых упаковок от радиуса частиц  $r$  и удельного числа контактов между ними  $n$ , то можно показать, что связь между ним и коэффициентом  $a$  линейна (кривая 2, рис. 1):

$$a = 4\pi r^3/3, \quad (2)$$

где  $n = NZ/2$ ,  $Z$  — координационное число, а  $N$  — удельное число частиц ( $N = 3\gamma/4\pi r^3$ ). Если  $n$  в (2) выразить через  $N$  и  $Z$ , то получим

$$a = \gamma Z/2\pi. \quad (3)$$

Рассмотрим, как определяется  $R$  для использования в формуле (1). Было установлено, что проводимость ЭДПС появляется при термообработке суспензий и за несколько секунд или минут достигает максимального значения в тот момент, когда олигомеры, сшиваясь в трехмерные полимеры, находятся в жидком состоянии и начинают переходить в высокоэластическое состояние (гель-точка). Связующие вследствие химической шивки стремятся к контракции, а каркасы из ДФ препятствуют ее полному осуществлению. По нашим экспериментальным данным усадка ЭДПС вследствие шивки связующих составляет не более 1–2 %, хотя собственная реакционная усадка  $\varepsilon_1$  последних составляет от 5 до 8 %. Сопоставление указанных значений усадки связующих и ЭДПС с учетом их  $\gamma$

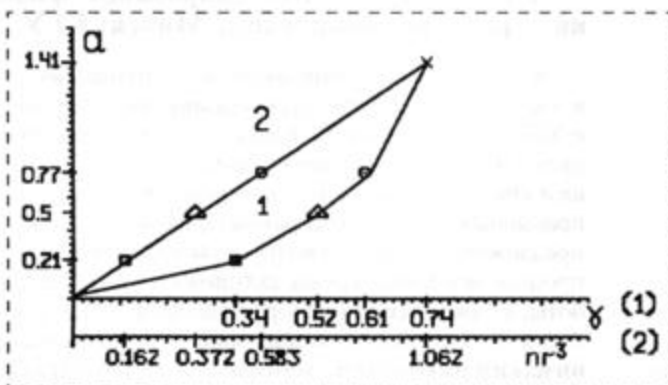


Рис. 1. Зависимость коэффициента  $a$  от  $\gamma$  (кривая 1) и параметра  $\pi r^3$  (кривая 2)

показывает, что действительно, контракция связующих при сшивке в ЭДПС полностью не реализуется. Связующие оказываются растянутыми, а каркасы из частиц ДФ сжаты (при механическом равновесии образцов ЭДПС суммарные напряжения в них должны быть равны нулю). Всестороннее сжатие каркасов компенсируется упругой деформацией частиц ДФ в точках их касания друг с другом, которые превращаются в контактные пятна площадью  $\pi c^2$  ( $c$  — радиус контактных пятен). Если на частицах отсутствуют диэлектрические пленки (частицы золота, серебра, графита и технических углеродов), то в соответствии с теорией электрических контактов [5] сопротивление между ними будут равны сопротивлению стягивания  $R_c$ :

$$R_c = 1/2c\chi, \quad (4)$$

где  $\chi$  — удельная электропроводность материала ДФ. При условии  $c \ll r$ , которое в рассматриваемых ЭДПС выполняется,  $R_c \approx R$ , т. е. контактное сопротивление можно приравнять к сопротивлению одной частицы, так как каждая из них по направлению тока состоит из двух полуконтактов (строго  $R = (1/2c\chi) - (1/2\pi r\chi)$  [5]). Учитывая сказанное, вместо (1) получим:

$$\chi' = 2ac\chi/r. \quad (5)$$

Допустим далее, что связующее полностью смачивает поверхность частиц ДФ и имеет к ней идеальную адгезию. Тогда в гель-точке, когда сшивка реализуется на 70–90 % ( $\epsilon_1^* = (0,7 - 0,9)\epsilon_1$ , [6]), вокруг каждой частицы в глубине образца ЭДПС возникнут напряжения, растягивающие связующее  $\delta_1$  ( $\delta_1 = K_2\epsilon_2$ , где  $K_2$  — эффективный модуль объемной упругости связующего;  $\epsilon_2$  — деформация растяжения связующего, как нереализованная часть  $\epsilon_1^*$ ), и уравнивающие их противоположно направленные напряжения, приложенные к поверхности частиц,  $\delta$  ( $\delta = K\epsilon$ , где  $K$  — модуль объемной упругости ДФ,  $\epsilon$  — относительная деформация растяжения частиц). Кроме напряжений  $\delta$  частицы испытывают в контактах усилия, прижимающие их друг к другу (контактные усилия  $F$ ), которые можно вычислить по следующей формуле:

$$F = \delta S, \quad (6)$$

где  $S$  — площадь основания шарового сегмента, приходящегося на каждый из  $Z/3$  контактов сферической частицы ДФ, контактные усилия в которых действуют в одном из трех направлений прямоугольных координат. Исходя из геометрических соображений [7], можно показать, что

$$S = 12\pi r^2(Z-3)/Z^2. \quad (7)$$

Учитывая, что  $\delta = \delta_1$  и используя (7) вместо (6), получим следующую формулу:

$$F = 12\pi r^2 K_2 \epsilon_2 (Z-3)/Z^2. \quad (8)$$

Для вычисления  $\epsilon_2$  в [3] выведена следующая формула, учитывающая деформацию сжатия каркаса из частиц ДФ:

$$\epsilon_2 = \epsilon_1^* - 1,5(\lambda\epsilon_2)^{2/3}(1-\gamma)^{-1}, \quad (9)$$

где  $\lambda$  — коэффициент, показывающий зависимость  $\epsilon_2$  от концентрации и упругих свойств компонентов ЭДПС (второй сомножитель вычитаемого в равенстве (9) — это квадрат второго множителя формулы (10)). Для вычисления  $\epsilon_2$  по (9) необходимо воспользоваться формулой Кардано [8], так как (9) при решении превращается в кубическое уравнение. Далее, зная  $F$  по (8), можно вычислить  $c$  по формуле Герца [9]:

$$c = r[9\pi K_2 \epsilon_2 (Z-3)(1-\mu^2)/EZ^2]^{1/3}, \quad (10)$$

где  $\mu$  и  $E$  — соответственно коэффициент Пуассона и модуль Юнга ДФ. В принципе, величину  $c$  можно вычислить по формуле твердости [5] для ДФ, но она будет незначительно отличаться от значения  $c$  по (10). Вычислив  $c$  по (10), можно определить сопротивление стягивания по равенству (4) и далее, учитывая (5), получим следующую формулу для вычисления  $\chi'$  ЭДПС:

$$\chi'_B = 2a\chi[9\pi K_2 \epsilon_2 (Z-3)(1-\mu^2)/EZ^2]^{1/3}. \quad (11)$$

При использовании (11) мы получали значения  $\chi'_B$ , превышающие удельную электропроводность ЭДПС, определенную экспериментально ( $\chi'_3$ ), примерно в 10 раз. Анализ вычисленных и измеренных значений  $\chi'$  позволил установить три основные причины их расхождения.

Во-первых, для придания неотвержденным ЭДПС реологических свойств, позволяющих использовать ту или иную технологию нанесения их на подложки, в них вводят связующие в небольшом избытке по отношению к оптимальному его содержанию  $(1-\gamma)$  для получения максимальной электропроводности систем:  $\Delta(1-\gamma) = 0,01-0,02$ . В результате часть реакционной усадки связующих идет на "поглощение" этого избытка и поэтому в формуле (9) вместо  $\epsilon_1^*$  необходимо использовать  $\epsilon_3$ , меньшее  $\epsilon_1^*$  на  $\Delta(1-\gamma)$ :

$$\epsilon_3 = \epsilon_1^* - \Delta(1-\gamma). \quad (12)$$

Во-вторых, к снижению проводимости ЭДПС  $\chi_3$  приводит эффект, названный нами краевым. Суть его в следующем. Представим, что на подложку нанесен образец суспензии ЭДПС (рис. 2), связующее которой сшивается, уменьшаясь в объеме. В глуболежащих слоях это вызовет прижатие

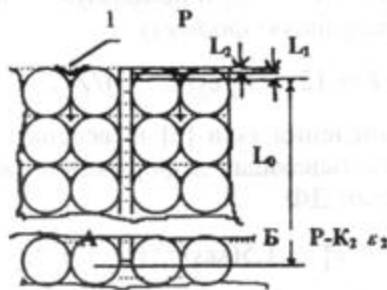


Рис. 2. Схема образца ЭДПС к определению глубины влияния краевых эффектов

частиц ДФ друг к другу. В самом верхнем слое со стороны воздуха ничто не ограничивает контракцию связующего, поэтому оно в участках I будет сшиваться, не прижимая частицы друг к другу. Кроме того, вследствие контракции связующего нижних слоев связующее верхних слоев может затекать вниз (см. стрелки на рис. 2), уменьшая там нереализованную долю усадки сшивки связующего. Все это приведет к тому, что контакты между частицами верхних слоев будут механически более слабыми и менее проводящими по сравнению с контактами частиц глуболежащих слоев. Это снижение проводимости слоев ЭДПС, граничащих с воздухом, мы назвали краевым эффектом, оно подтверждается и экспериментально, и известной зависимостью удельного сопротивления слоев ЭДПС от их толщины [1].

Допустим, что отрицательное влияние краевого эффекта распространяется на глубину до уровня AB (см. рис. 2).

На этом уровне при сшивке связующего и при некотором значении его вязкости (вязкость связующих в процессе сшивки растет [6]), когда оно перестанет течь (с достаточной точностью — это гель-точка), в межчастичном пространстве установится давление, равное  $(P - K_2 \epsilon_2)$ , где  $P$  — давление окружающей газовой среды. Межчастичные просветы, по которым течет связующее, можно представить эффективными капиллярами с радиусом  $r_0 = 2r(1 - \gamma)/3\gamma$  [10]. В них связующее, вследствие сшивки, втягивается само в себя. Допустим, например, что часть капилляра  $L_2$  (см. рис. 2) к моменту времени  $\tau$ , соответствующему  $\epsilon_2$ , окажется без связующего. На границе с воздухом связующее будет недеформировано, а на уровне AB оно окажется растянутым в соответствии с  $\epsilon_2$ . Если бы и на уровне AB связующее оказалось недеформированным, то оно заполняло бы капилляр до уровня  $L_0$ . Учитывая величины  $(P - K_2 \epsilon_2^*)$ ,  $L_0$ ,  $L_1$ ,  $L_2$  и предполагая вместо неравномерного течения связующего равномерное, а также используя уравнение

Пуазейля [11], мы вывели формулу зависимости глубины затекания в капилляр связующего при его сшивке от различных параметров:

$$L = 0,5r_0(1 - \epsilon_2)[K_2\tau/\eta_3(1 - \epsilon_2)]^{1/2}, \quad (13)$$

где  $L = L_0 + L_1 + L_2$ ;  $\eta_3$  — значение эффективной вязкости связующего при условии ее постоянства за время  $\tau$ . В действительности вязкость связующего в процессе сшивки изменяется от некоторого начального значения  $\eta_0$  до конечного  $\eta_m$ , при котором прекращается течение. Учет изменения вязкости в процессе сшивки позволил получить более строгую зависимость  $L$  от рассмотренных параметров. Суть вывода этой зависимости в том, что если время сшивки связующего разбить на такое число  $m$  равных промежутков  $\Delta\tau = \tau/m$ , чтобы за любой промежуток  $\Delta\tau$  вязкость связующего оставалась постоянной и равной  $\eta_1$ , то для каждого такого промежутка времени значение  $L_1$  по формуле (13) будет соответствовать доле реакционной сшивки, равной  $\Delta\epsilon_2 = \epsilon_2/m$ . Суммирование всех  $L_1$  дает следующую формулу:

$$L = 0,5r_0(1 - \epsilon_2) \left\{ K_2\tau \sum_{j=1}^m [(m/j)^2(\eta_{j-1} + \eta_j) \times (m + 0,5j\epsilon_2)/2]^{-1} \right\}^{0,5}. \quad (14)$$

Для получения более проводящих пленок из МПК и ПТП надо стремиться к уменьшению  $L$ . Из формул (13) и (14) видно, что это достигается уменьшением  $\tau$  и  $r_0$ , т. е. увеличением скорости отверждения ЭДПС, а также уменьшением размера частиц ДФ и увеличением ее концентрации. Пользоваться изменением величин  $K_2$  и  $\epsilon_2$  нецелесообразно, так как они определяют проводимость самих ЭДПС по (11). Увеличение вязкости связующего также может оказаться нецелесообразным, так как приведет к затруднению формирования проводящих контактов между частицами, которые, как указывалось ранее, беспрепятственно образуются при сшивке связующего до достижения им гель-точки. Практически устранить краевые эффекты можно сшивкой связующих при нахождении пленок ЭДПС между двумя параллельными плоскостями субстратов.

В-третьих, известно, что смачивание связующими поверхности субстратов и частиц ДФ никогда не бывает идеальным. Даже если из объема связующих будут удалены пузырьки воздуха, попавшие в них при смешении компонентов ЭДПС, то всегда на твердой поверхности частиц ДФ будут находиться микропустоты, заполненные воздухом [12]. Рассмотрим, как воздушные включения влияют на  $\chi'$  ЭДПС. Обозначим долю объема воздуха в еди-

нице объема ЭДПС буквой  $\sigma$  ( $\sigma \ll 1$ ) и рассмотрим процесс сшивки связующего. Очевидно, что изменение удельного объема связующего при беспрепятственной контракции  $\Delta V_{св}$  может быть найдено по следующему выражению:

$$\Delta V_{св} = \varepsilon_3(1 - \gamma). \quad (15)$$

В глуболежащих от границы с воздухом слоях ЭДПС указанному изменению объема связующего будут препятствовать окружающие частицы ДФ и воздушные включения ( $\sigma$ ). Наименьшим будет препятствие со стороны воздушных включений, которые вследствие контракции связующего будут расширяться. Их максимально возможный удельный объем  $z$  после завершения контракции связующего (при его идеально высокой упругости) может быть вычислен суммированием  $\sigma$  и  $\Delta V_{св}$ :

$$z = \sigma + \varepsilon_3(1 - \gamma). \quad (16)$$

Используя газовый закон Бойля [13], вычислим давление в конечных пузырьках воздуха после реакции сшивки:

$$P_1 = P\sigma / [\sigma + \varepsilon_3(1 - \gamma)]. \quad (17)$$

Возникшая в воздушных пузырьках разность давлений уравнивается противоположно направленным напряжением в связующем:

$$-(P_1 - P) = K_1 \varepsilon_4, \quad (18)$$

где  $\varepsilon_4$  — деформация растяжения, а  $K_1$  — модуль объемной упругости связующего ( $\varepsilon_4 \ll \varepsilon_2$ ,  $K_1 \approx 1,6 \div 1,9$  ГПа,  $K_2 < 0,18$  ГПа [3]). Далее аналогично выводу (8) и (11) с учетом (17) и (18) получим:

$$F = 12\pi r^2 P [\varepsilon_3(1 - \gamma) / \{\sigma + \varepsilon_3(1 - \gamma)\}] \times (Z - 3) / Z^2, \quad (19)$$

$$\chi' = 2a\chi \{ [9\pi P \{ (\varepsilon_3(1 - \gamma)) / (\sigma + \varepsilon_3(1 - \gamma)) \}] \times (Z - 3)(1 - \mu^2) / EZ^2 \}^{1/3}. \quad (20)$$

Эти формулы отличаются от формул (8) и (11) только тем, что в них напряжение растяжения связующего выражено произведением  $P$  на множитель в квадратных скобках. При  $\sigma$ , стремящемся к нулю, выражение в квадратных скобках формул (19), (20) будет стремиться к максимальному значению, равному единице. Тогда  $\varepsilon_4 = P/K_1$ , и если  $P$  равно атмосферному давлению ( $\sim 10^5$  Па), то максимальное значение  $\varepsilon_4 = 6 \cdot 10^{-5}$ . При таких незначительных деформациях растяжения связующих деформация каркасов ДФ на сжатие будет очень мала и ею можно пренебречь. В этом случае сопоставление значений  $F$ , вычисленных по (8) и (19), а также значений  $\chi'$ , вычисленных по (11) и (20), показывает, что первые значения превосходят вторые соответственно в 25 и в 8,5 раз. Иными словами, если значения  $\chi'_в$  определять по (20), то разница

между  $\chi'_в$  и  $\chi'_з$  составит не более 20—25 % (такой результат получен для применяющихся в промышленности серебросодержащих МПК марок К-8; К-13; К-16 [2, 3]). Это вполне допустимый результат расхождения вычисленных и измеренных значений проводимости таких сложных систем, как ЭДПС. Из формулы (20) видно, что наряду с такими способами регулирования проводимости ЭДПС, как изменение их концентрации ( $\gamma$  и  $Z$  по (3)), подбор ДФ по физико-механическим свойствам, включая электропроводность ( $E$ ,  $\mu$ ,  $\chi$ ), имеется еще один мощный метод — это варьирование внешнего давления  $P$ . На примере ЭДПС на основе эпоксидного связующего с использованием в качестве ДФ порошка серебра нами экспериментально подтверждена взаимосвязь величин  $\chi'$  и  $P$  в соответствии с (20).

\*\*\*

В заключение отметим, что формула (20) не содержит размера частиц и ее можно использовать в случае полидисперсных наполнителей МПК и ПТП. В работе [14] показано, как в этом случае можно находить зависимость  $n$  от  $\gamma$  и рассчитывать  $\chi'$  ЭДПС при помощи компьютера. Там же и в [3, 15] рассмотрен вопрос о  $\chi'$  ЭДПС, частицы ДФ которых покрыты оксидными пленками.

#### Список литературы

1. Гальперин Б. С. Непроволочные резисторы. Л.: Энергия, 1968. 284 с.
2. Гуль В. Е., Шенфильд Л. З. Электропроводящие полимерные композиции. М.: Химия, 1984. 240 с.
3. Козлов Г. В. Контактные взаимодействия в электропроводящих полимерных наполненных композициях: Дис. ... докт. хим. наук. М.: ИФХ АН СССР, 1989. 341 с.
4. Козлов Г. В. Структура толстых полимерных пленок и механизм электропроводности // Техника средств связи. Сер. Технология производства и оборудование. 1991. Вып. 3 С. 26—34.
5. Хольм Р. Электрические контакты: Пер. с англ. М.: Издательство, 1961. 464 с.
6. Малкин А. Я., Куличихин С. Г. Реология в процессах образования и превращения полимеров. М.: Химия, 1985. 240 с.
7. Выгодский М. Я. Справочник по элементарной математике. М.: Наука, 1978. С. 254—255.
8. Брошштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. М.: Наука, 1986. 544 с.
9. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика сплошных сред. М.: Гос. изд. технико-теоретической литературы, 1954. С. 671—678.
10. Гольдштейн М. А. Процессы переноса в зернистом слое. Новосибирск: Институт теплофизики СО АН СССР, 1984. 164 с.
11. Воюцкий С. С. Курс коллоидной химии. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Химия, 1975. С. 323—328.
12. Физико-химия многокомпонентных полимерных систем. Т. 1 / Под ред. Ю. С. Липатова. Киев: Наукова думка, 1986. С. 251—260.
13. Киреев В. А. Курс физической химии. М.: Изд-во хим. лит., 1956. С. 124—127.
14. Козлов Г. В., Вальцфер В. А., Погорелов Б. А. Расчет электропроводности полимерных композиций с полидисперсным наполнителем // Коллоид. журн. 1992. Т. 54. № 3. С. 73.
15. Козлов Г. В., Прямова Т. Д. О механизме электропроводности полимерных композиций, наполненных порошком никеля // Коллоид. журн. 1988. Т. 50. № 5. С. 1003—1006.

*В этом номере мы продолжаем публикацию аннотационных отчетов, полученных в инициативных научных проектах в области математики, информатики, механики, химии и физики и поддержанных РФФИ по итогам конкурса 1997 г. (начало см. в № 1—12, 2001 г., № 1—4, 2002 г.). Данные по исполнителям проектов можно найти в "Информационном бюллетене РФФИ" № 5 за 1997 г.*

<http://intra.rsfbr.ru>

## АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

### Диссипация СВЧ энергии фуллереновой чернью и углеродными нанокapsулятами металлов

Номер проекта: 97-02-17488-а

Год предоставления отчета: 1997

Для получения фуллереносодержащей сажи (фуллереновой черни) проводилось испарение графитового электрода в разряде электрической дуги в атмосфере гелия. Сделаны некоторые заключения по оптимизации процесса дугового разряда. Показано, что содержание фуллеренов в саже зависит от условий горения электрической дуги. Наиболее критическими параметрами являются скорость подачи электрода и расстояние между электродами. Максимальный выход фуллеренов (около 23 и 10 % кристаллитов графита) наблюдается при следующих условиях: скорость подачи электрода 1—2 мм/мин, межэлектродное расстояние 5—12 мм, давление гелия в камере 500 Торр. При давлении 2000 Торр, расстоянии между электродами 0,3—0,5 мм и скорости подачи 8 мм/мин выход фуллеренов составляет 5 % и около 50 % кристаллитов. Полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод, что графит испаряется с поверхности электрода не только в виде мелких кластеров, но и кластеров с размерами до ~5 мкм.

Для повышения точности измерений и сокращения времени эксперимента усовершенствована установка для измерения диэлектрических параметров на СВЧ. Действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости фуллереновой черни, черни с экстрагированными фуллеренами, ацетиленовой сажи и чистых фуллеренов измерены на СВЧ (при длинах волн 6,3; 11; 18; 27 см). Измерены удельные плотность и поверхности указанных образцов. Наблюдается корреляция между значениями диэлектрической проницаемости фуллереновой сажи и содержанием в ней фуллеренов: при увеличении содержания фуллеренов в саже уменьшаются значения диэлектрической проницаемости. Проведено также испарение никель-

и кобальт-графитовых композитов в разряде электрической дуги для получения чистых никелевых и кобальтовых нанокapsул.

Экспериментальные данные приводят к заключению, что использование фуллереновой черни вместо ацетиленовой сажи расширяет возможности в создании радиопоглощающих материалов с различными электрическими и весовыми характеристиками.

### Исследование релаксации механических напряжений при молекулярно-лучевой эпитаксии фторидов щелочноземельных металлов на пористом кремнии

Номер проекта: 97-02-18569-а

Год предоставления отчета: 1997

Проведено эллипсометрическое изучение слоев пористого кремния. Отработана методика прецизионного определения характеристик пористого слоя с использованием многоволновой эллипсометрии и эллипсометрии с пространственным разрешением. Определены оптимальные температуры подложки (TS) для эпитаксии пленок фторидов на подложках Si(111).

Эксперименты по выращиванию пленок фторида кальция на пористом и сплошном кремнии показали отличие оптимальной величины TS, необходимой для роста структурно-совершенной пленки CaF<sub>2</sub> на сплошном кремнии и на пористой поверхности. В случае сплошной подложки переход от TS = 500÷600 °C к TS = 700÷750 °C сопровождается улучшением структуры и морфологии пленки фторида. В противоположность этому в случае пористой подложки повышение TS приводило к увеличению уровня диффузного фона и появлению концентрических окружностей на картине ДБЭ, свидетельствующих о присутствии поликристаллического фторида кальция.

Проведены модельные эксперименты по выращиванию на пористом кремнии твердых растворов



Ge-Si с параметром решетки, близким к  $\text{CaF}_2$ . Из сравнения данных электронной микроскопии и рентгеновской дифрактометрии можно сделать вывод, что релаксация механических напряжений в пленках, выращенных на пористой подложке, происходит не за счет генерации в границе раздела сетки дислокаций несоответствия, а путем образования над порами упруго изогнутых в виде куполов участков пленки. Предполагается, что релаксация по такому же механизму проходит в гетеросистеме пористый кремний — фторид кальция.

## Нелинейные кинетические эффекты в композитах и текстурах вблизи перехода металл-диэлектрик

Номер проекта: 97-02-16923-а

Год предоставления отчета: 1997

В рамках данного проекта впервые:

- вычислены критические индексы нелинейной проводимости двухфазной среды (среды Дыхне) во фрактальной области;
- предсказана генерация комбинационных гармоник в текстурах, обладающих микросимметрией;
- выведены точные соотношения взаимности для эффективных проводимостей во фрактальной области;
- обнаружена нестабильность линейного режима протекания тока в периодических решетках Дыхне;
- изучены аномалии токопереноса в текстурах в магнитном поле; вычислено критическое поле перехода среды в нелинейную фазу;
- найдены скейлинговые функции периодической решетки для всей области изменения параметров системы: концентрации компонентов и отношения проводимостей ячеек.

## Дифракционная оптика (синтезированные голограммы) в рентгеновском и видимом диапазонах для микродиагностики и нанотехнологии

Номер проекта: 97-02-17318-а

Год предоставления отчета: 1997

Практически реализована целая цепочка расчетных шагов, начинающаяся с проектирования желаемого изображения и оканчивающаяся массивом данных для электронной литографии с оценкой предельной эффективности синтезированной голограммы. В их числе разработаны численные средства, позволяющие проектировать желаемое изображение с помощью ПК. Второй этап проектирования заключается в расчете поля фазового сдвига в плоскости голограммы (собственно голограммы). Последний шаг подготовки данных представляет сложный расчет, в котором поле фазового

сдвига последовательно превращается: в поле рельефа прозрачной пластинки; поглощенную электронным резистом дозу экспонирования; поле времен экспонирования с учетом эффекта близости.

Разработанные и реализованные средства моделирования позволяют проанализировать влияние различных факторов на эффективность преобразования однородного потока излучения в спроектированное изображение, в том числе: контраст резиста, время проявления, ошибки в рельефе, число уровней дискретизации рельефа, длина волны, размер апертуры, когерентность света, вариации времени экспонирования и т. д.

Развиты методы оценки эффективности голограмм, причем по разработанной методике эффективность теперь можно рассчитывать в плоскости самой голограммы, а не в плоскости изображения, как это делалось раньше.

Реализованная схема оптимизации эффективности голограммы за счет подбора фаз в проектируемом изображении не является новой, подобные методы уже использовались. Предложен оригинальный метод слежения за процессом формирования профиля с помощью специальной структуры свидетеля, формируемого одновременно и рядом с рабочей структурой голограммы.

## Исследование пондеромоторного воздействия СВЧ поля на перенос массы и заряда в твердом теле

Номер проекта: 97-02-17252-а

Год предоставления отчета: 1997

За отчетный период (1997 г.) экспериментально обнаружено существенное влияние микроволновых полей на процессы сегрегации примесных элементов при спекании поликристаллических диэлектрических материалов, обуславливающее, в частности, более высокую нелинейность зависимости проводимости оксида цинка от напряженности электрического поля.

Разработана методика проведения экспериментальных исследований формирования рельефа на поверхности моно- и поликристаллических материалов, нагреваемых поляризованным высокочастотным полем. Исполнители проекта получили возможность использовать волоконно-оптический измеритель температуры Accufiber M10 для бесконтактной диагностики температуры объекта, нагреваемого в микроволновом поле, и отработали соответствующую методику измерения.

Разработана методика расчета распределения интенсивности микроволнового поля для реальной геометрии СВЧ печи. На основании выполненных расчетов предложена и экспериментально реализована оптимизация конфигурации печи, позволившая существенно повысить степень однородности микроволнового нагрева.

Проведены теоретические исследования зависимости пондеромоторного эффекта в области контакта двух сред от характеристик контактной области.

Построена аналитическая модель, описывающая массоперенос, индуцируемый пондеромоторным воздействием высокочастотного поля в окрестности ребра двумерного угла, формирующегося вследствие эффекта огранки на контакте двух кристаллических зерен. Показано, что данный процесс способствует "залечиванию" относительно больших пор в керамических материалах, которое весьма затруднено в условиях традиционного спекания.

## Исследование структурных и химических превращений на поверхности природных и синтетических оксидов, индуцированных лазерным излучением инфракрасного диапазона

Номер проекта: 97-02-17967-а

Год предоставления отчета: 1997

Было проведено исследование воздействия непрерывного и импульсного инфракрасного  $\text{CO}_2$  лазера на поверхность кристаллических и аморфных силикатов. В результате проведенных исследований установлено, что обнаруженные нами ранее явления селективной возгонки оксидов кремния с поверхности силикатов и избирательного обогащения поверхности силиката металлообразующими элементами имеют место при действии излучения  $\text{CO}_2$  лазера не только на поверхность алюминий-, железо-, медь- и марганецсодержащих силикатов, но и при лазерном воздействии на поверхность широкого круга силикатов, имеющих полосу поглощения в области частоты лазерного воздействия.

Было обнаружено также, что воздействие инфракрасного лазерного излучения на поверхность монокристалла циркония ( $\text{ZrSiO}_4$ ), наряду с явлениями селективной возгонки оксидов кремния и обогащения поверхности цирконием, приводит к изменению электронного состояния атомов циркония, входящих в состав силикатной матрицы. На основе рентгеноэмиссионного исследования облученного лазером циркония было показано, что в процессе фотохимических превращений на поверхности циркония возникают дефектные циркониевые кластеры, в которых атомы циркония могут находиться в неравновесных электронных состояниях, наличие которых обнаруживается по перераспределению интенсивностей  $K$  и  $L$  компонент в рентгеноэмиссионных спектрах облученного лазером циркония.

С помощью фотолюминесцентного анализа облученных излучением импульсного  $\text{CO}_2$  лазера образцов аморфного и кристаллического кварца и других силикатов (длительность импульса 100 нс, энергия в импульсе 2,3 Дж) было проведено исследование дефектных центров, образующихся в мат-

рице силикатов под действием этого излучения. Было установлено образование центров типа дважды координированного иона кремния  $\text{Si}^{2+}$  с неподеленной электронной парой, возникновение которого обусловлено разрывом кремнекислородных связей силикатной матрицы. Обнаружена также суперлюминесценция на этих дефектных центрах во всех указанных силикатах на длинах волн 360 и 370 нм, имеющая узкую полосу в спектре возбуждения на длинах волн соответственно 340 и 360 нм. Полученные результаты подтверждают сделанный нами ранее вывод, что при действии лазерного излучения на силикаты происходит селективный разрыв прочных ковалентных кремнекислородных связей, вызываемый резонансным лазерным воздействием. Результаты проведенных исследований могут найти применение в микроэлектронике, интегральной оптике, новых способах записи и считывания информации.

## Исследование физической природы формирования качественно новых тепловых и других физических свойств в материале при переводе его в ультрамелкозернистое состояние

Номер проекта: 97-02-17236-а

Год предоставления отчета: 1997

Были получены ультрамелкозернистые (УМЗ) образцы металлов Cu, Fe, Ni и сплава  $\text{Ni}_3\text{Al}$ , исследованы особенности микроструктуры и сверхтонкой электрической и магнитной структуры, эволюция микроструктуры и тепловыделение при нагреве полученных образцов, а также процессы упорядочения и изменения механических свойств сплава  $\text{Ni}_3\text{Al}$  в результате его отжига. УМЗ структура с размером зерен около 0,1 мкм и неравновесными границами зерен в образцах была сформирована с помощью интенсивной пластической деформации. Экспериментально установлено, что неравновесные границы зерен имеют избыточную энергию (энтальпию). Предложено ввести понятие степени неравновесности границ зерен  $zH$ , равное относительному превышению энтальпии неравновесных границ над энтальпией равновесных границ зерен материала.

Отжиг полученных образцов приводит к эволюции их микроструктуры, которую можно разбить на два основных этапа. Вначале в результате отжига при гомологической температуре 0,3–0,4 происходит переход границ зерен из неравновесного в более равновесное состояние, сопровождающееся незначительным ростом среднего размера зерен. Дальнейшее повышение температуры вызывает обычную собирательную рекристаллизацию. Однако температура начала собирательной рекристаллизации оказалась существенно (на  $0,1...0,2 T_{пл}$ ) ниже, чем соответствующая температура для крупнозернистых образцов.

Сравнительные мессбауэровские измерения железа с крупнозернистой, с УМЗ микроструктурой и с повышенной плотностью решеточных дислокаций и расчет экспериментальных спектров тремя независимыми математическими процедурами (разностным методом, безмодельным расчетом и моделированием формы спектра) подтвердили наличие в приграничных слоях толщиной около 11 нм атомов, параметры сверхтонкой электрической и магнитной структуры которых фиксированы, но отличны от параметров атомов внутри зерен (от параметров крупнозернистого железа). Характеристическая температура Дебая приграничных атомов ниже, чем у внутризеренных атомов на 30 К. Показано, что с помощью интенсивной пластической деформации в сплаве  $Ni_3Al$  можно получить ультрамелкозернистую ( $d = 50$  нм) полностью разупорядоченную структуру. Влияние температуры отжига на механические свойства этого материала носит сложный немонотонный характер. Максимальную прочность и пластичность имеет материал в полностью разупорядоченном состоянии. Влияние температуры отжига на механические свойства объясняется структурными изменениями материала, а именно, формированием ближнего и дальнего порядка и изменением преимущественного механизма деформации.

## Разработка методов структурного анализа квазикристаллов

Номер проекта: 97-02-17024-а  
Год предоставления отчета: 1997

Проведен анализ устойчивости квазикристаллического состояния в рамках феноменологической теории Ландау. Определена группа симметрии ПП, его физическая реализация (вектора квазипериодичности) и ведущее представление. Для плоского случая проведена симметричная классификация аперриодических состояний и определены основные типы квазикристаллов. Для них разработаны алгоритмы построения одно- и двумерных квазирешеток. Также разработан несколько вариантов квазирешеток, обладающих точечной симметрией. Все модели позволяют описывать плотность объектов в аналитическом виде и впервые моделировать квазикристаллы как бесконечные объекты, а не по ограниченному числу точек. Проведен анализ структуры квазирешеток и ее связь со строгой симметрией и с квазисимметрией. Для построенных моделей разработаны способы расчета Фурье-образов и получены теоретические дифрактограммы в приближении точечноподобных атомов. Практически для всех исследованных случаев спектр состоит из дискретных составляющих, расположенных аперриодически, и квазинепрерывного фона. Уровень последнего составляет от долей процента до десяти процентов для некоторых моделей.

Анализ рассчитанных дифрактограмм показал, что объекты, имеющие почти одинаковое располо-

жение атомов и на ограниченном промежутке практически не отличимые, имеют различные спектры, если расчет ведется с учетом всех атомов. Это подчеркивает актуальность разрабатываемых по проекту моделей неограниченных квазикристаллов. Следует отметить, что хотя результаты, полученные на настоящем этапе, относятся к плоскому случаю, тем не менее они моделируют структуру и спектр реальных трехмерных квазикристаллов, у которых квазипериодичность имеет линейный или плоский характер. Из разработанных моделей нетрудно сконструировать и более сложные трехмерные объекты. При выполнении проекта определенное внимание было уделено также экспериментальным дифрактограммам. Был проведен анализ нескольких плоских дифрактограмм, показавший, что концепция квазирешеток применима не только к квазикристаллам, но и к их спектрам. Получено, что спектры квазикристаллов можно описать в аналитическом виде как плотность соответствующей квазирешетки. Используя этот факт, предложено анализировать структуру квазикристаллов прямым методом, подбирая квазирешетку, описывающую интенсивность спектра, и рассчитывая электронную плотность как ее Фурье-образ.

## Условия образования, термическая стабильность, структура и свойства новых массивных аморфных сплавов

Номер проекта: 97-02-17753-а  
Год предоставления отчета: 1997

Проведена сравнительная оценка стеклообразующей способности сплавов  $Zr_{40}Ti_{50}Cu_{10}$ ,  $Zr_{50}Cu_{15}Ni_{18,5}Ti_{16,5}$ ,  $Zr_{65}Al_{7,5}Cu_{17,5}Ni_{10}$ ,  $Ni_{70}Mo_{10}P_{20}$ ,  $Co_{69,6}Fe_{1,3}Mn_{4,5}Mo_1Si_{14,3}B_{9,3}$  по максимальной толщине аморфного слоя  $dc$  образцов, отлитых в клиновидную изложницу. Обнаружено, что для Zr сплавов  $dc$  достигает 2–2,8 мм, для Ni и Co сплавов — не превышает 0,1 мм.

Методом струйного литья получены массивные образцы сплавов Zr в виде стержней диаметром 2 и 3 мм с аморфной структурой. Методом спиннингования расплава получены толстые (0,10–0,36 мм) и тонкие (0,03–0,05 мм) аморфные ленты всех сплавов, выбранных для изучения. Впервые методом плазменного распыления специально приготовленной кристаллической заготовки сплава Co получены массивные покрытия толщиной 0,2–2,0 мм с аморфной (в основном) структурой. Методом INROWASP получены аморфные (диаметром 0,1–0,15 мм) и кристаллические (диаметром 0,15–0,4 мм) гранулы сплава Co.

Методами ДТА, ДСК, рентгеноструктурного и ПЭМ анализов, измерением микротвердости изучена термическая стабильность аморфного состояния, последовательность структурных превращений и механизм кристаллизации полученных образцов с различной толщиной аморфного слоя. Определе-

ны температуры кристаллизации и энергии активации стадий кристаллизации. Установлено, что как термическая стабильность аморфного состояния, так и механизм кристаллизации в массивных сплавах и ленточных образцах являются одинаковыми. Увеличение толщины аморфного слоя не приводит к изменению температурного интервала устойчивости состояния переохлажденной жидкости.

### **Исследования характерных особенностей электронной структуры манганитов редкоземельных элементов в зависимости от степени легирования методом фотоэлектронной спектроскопии с использованием синхротронного излучения**

Номер проекта: 97-02-17847-а  
Год предоставления отчета: 1997

Экспериментально исследованы электросопротивление, теплоемкость и фотоэлектронные спектры монокристаллов соединения  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  с различной концентрацией стронция  $x$ . На основе результатов по теплоемкости определены характеристическая температура Дебая, электронная плотность состояний на поверхности Ферми, критическая температура фазового перехода из парамагнитного в ферромагнитное состояния и энтропия, связанная с этим переходом. Результаты по фотоэлектронной спектроскопии показывают, что при увеличении концентрации стронция наблюдается возникновение плотности состояний на уровне Ферми, а также сдвиг особенностей фотоэлектронных спектров, качественно соответствующих модели жесткой зоны. В валентной зоне монокристаллических образцов наблюдалась особенность, не описанная в литературе. Эта особенность меняется с изменением концентрации стронция и может быть связана с проявлением эффектов зонной структуры.

### **Теоретические и экспериментальные исследования природы "1/8" аномалии и механизма перехода диэлектрик-проводник в допированных ВТСП типа "2-1-4"**

Номер проекта: 97-02-16471-а  
Год предоставления отчета: 1997

Приготовлены серии монокристаллов и монокристаллических пленок составов  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  и  $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$  в интервале составов 0,05 с различными типами неоднородного распределения щелочноземельных ионов. Сделан вывод о (химической) природе спонтанного фазового разделения ( $\delta$ ) в ВТСП  $\text{La}_{2-x}\text{M}_x\text{CuO}_4$ , обусловленного тенденцией примесных атомов собираться в проводящих

областях с  $x > 0,125$ . Предложена физическая картина эволюции электронной структуры ВТСП при допировании гетеровалентной примесью замещения. В данной модели переход от диэлектрика к "металлу" при гетеровалентном допировании проходит через стадию формирования так называемых U-центров, которые возникают на соседних ионах меди в некотором диапазоне концентраций, когда становятся возможны двухчастичные электронные переходы из кислородной зоны на пару соседних медных ионов (в то же время одночастичные переходы еще запрещены). Как показано, это оказывается возможным, когда реализуется определенное пространственное расположение допированных ионов (одинаковое как для "дырочного", так и для "электронного" допирования). Это пространственное расположение отвечает (при равномерном распределении) концентрации  $x = 1/8$ , и именно это значение  $x$  соответствует переходу из диэлектрического в проводящее состояние и разрушению АФМ-порядка. Важным обстоятельством является тот факт, что как при дырочном, так и при электронном допировании носителями оказываются дырки в кислородной зоне.

### **Токовые неустойчивости и возбуждение электромагнитных колебаний миллиметрового и субмиллиметрового диапазона при продольном баллистическом и поперечном транспорте в квантоворазмерных полупроводниковых структурах**

Номер проекта: 97-02-17474-а  
Год предоставления отчета: 1997

Проведено теоретическое моделирование процессов последовательного резонансного туннелирования и образования доменов электрического поля в сверхрешетках GaAs/AlGaAs с различными параметрами ям и барьеров. Показано, что введение в сверхрешетку дефекта легирования (в виде одной квантовой ямы с пониженной концентрацией легирующей примеси) может при определенных условиях приводить к формированию динамических доменов электрического поля, движущихся вдоль оси роста структуры. Движение домена приводит к возбуждению осцилляций тока. Предсказан комбинированный эффект сосуществования двух типов осцилляций тока — как обусловленных устойчивостью границы статического домена, так и связанных с движением динамического домена. В выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии сверхрешетках GaAs/AlGaAs с параметрами, определенными из модельных расчетов, экспериментально зарегистрированы незатухающие осцилляции тока, возникающие при приложении к ним постоянного напряжения, соответствующего платообразным участкам ВАХ. Частотный спектр осцилляций примерно соответствовал результатам моделирования. Наблюдаемые ос-

циляции тока интерпретированы как обусловленные неустойчивостью доменной границы. Построена теория усиления и генерации электромагнитного излучения на частоте нечетных гармоник циклотронного резонанса тяжелых дырок с отрицательной эффективной массой в полупроводниковом алмазе в субмиллиметровом диапазоне длин волн. Обнаружено значительное усиление на третьей гармонике циклотронного резонанса, что позволяет существенно продвинуть диапазон генерации в коротковолновую часть субмиллиметровой области спектра. На основе теоретического анализа проведен поиск квантоворазмерных структур, реализующих закон дисперсии с отрицательными эффективными массами носителей заряда, и предложен технологически реализуемый тип такой структуры.

### Исследование механизмов возбуждения люминесценции кристаллов ВУФ и рентгеновскими фотонами

Номер проекта: 97-02-17414-а

Год предоставления отчета: 1997

Проведено экспериментальное исследование фотолюминесценции  $PbWO_4$ ,  $Gd_3Ga_5O_{12}$ ,  $Li_2B_4O_7$ ,  $LiBaF_3$  (чистого и активированного  $Eu$  или  $Ce$ ),  $CsCl$ ,  $CsBr$ ,  $CsI$ ,  $CaF_2$ ,  $SrF_2$ ,  $BaF_2$ , а также сложных фосфатов со структурой витлопита, активированных европием ( $Ca_{10}M(PO_4)_7 - Eu$  и  $Ca_9MgM(PO_4)_7 - Eu$ , где  $M = Li, Na, K$ ) при возбуждении ВУФ и рентгеновским синхротронным излучением, для ряда этих кристаллов измерены также кривые энергетического распределения фотоэлектронов при возбуждении 50–160 эВ. Из этих измерений оценены параметры энергетических зон (в том числе ширины запрещенных зон, в тех случаях, когда они были неизвестны), исследованы механизмы передачи энергии центрам свечения, исследована кинетика наносекундных и субнаносекундных полос люминесценции, в случае  $PbWO_4$  определены оптические константы, исследовано влияние стехиометрии на радиационную стойкость, предложены модели центров свечения. На примере щелочногалогидных кристаллов исследованы процессы дефектообразования в объеме и на поверхности при релаксации высокоэнергетических возбуждений, а также процессы релаксации остовных дырок на  $N_{4,5}$  — краю катиона. Для флюоридов щелочноземельных кристаллов исследована люминесценция триплетного и синглетного экситонов. Теоретически исследовалась зависимость эффективности неорганических кристаллических сцинтилляторов от особенностей их электронной структуры и свойств электронных возбуждений. Методом Монте-Карло в рамках поляризационного приближения проведено моделирование электрон-

ного каскада для  $CeF_3$ . Рассмотрено влияние локальной плотности электронных возбуждений, создаваемых каскадом Оже распадов остовных дырок и неупругим электрон-электронным рассеянием на выход сцинтилляций. Для кроссломинесцентных кристаллов в приближении сильной связи исследована зависимость спектров свечения от состояния остовой дырки (свободная или локализованная).

### Металлические баллистические гибридные (нормальный металл-сверхпроводник) наноструктуры: строение и электронный транспорт

Номер проекта: 97-02-17031-а

Год предоставления отчета: 1997

За отчетный период были получены следующие результаты.

- Реализован экспериментальный подход по получению тонких (5–100 нм) монокристаллических пленок тугоплавких металлов ( $Mo, W, Nb$ ), включая двухслойные гетероэпитаксиальные пленки  $Mo-Nb$ , с большими (до микрометра) остаточными длинами свободного пробега электронов проводимости. Использован ростовой метод импульсного лазерного испарения в сверхвысоком вакууме на  $r$ -плоскость монокристаллического сапфира.
- Проведено исследование условий оптимального роста пленок. Внешняя поверхность монокристаллических пленок металлов, имеющих объемцентрированную кристаллическую решетку, соответствовала плоскости (100). Средняя шероховатость поверхности была менее монослоя, а длина корреляции — порядка 100 нм.
- Обнаружен существенный вклад рассеяния малых угловых электронов на границах раздела в электронную проводимость полученных пленок. Показано, что при толщине пленок 30–50 нм, много больших фермиевской длины, существенны квантовые поправки в электронном транспорте.
- Реализован экспериментальный подход по получению монокристаллических наноструктур с использованием электронной литографии маскирующих покрытий. Впервые получены двухслойные ( $Mo/Nb$ ) монокристаллические баллистические наноструктуры с латеральными размерами до 200 нм типа (крест) и (мостик) и проведены начальные исследования электронного транспорта в них при низких температурах.
- Развита метод зондовой литографии проводящими кантилеверами с использованием СЗМ (P4-MT-MDT). Реализована литография с латеральным разрешением до 20 нм на поверхности тугоплавких металлов, а также  $a-C:H$  пленок, которые предполагается использовать как наномаски.

# ИНФОРМАЦИЯ

Международная  
научно-практическая конференция  
"Фундаментальные проблемы  
пьезоэлектрического  
приборостроения"  
**"ПЬЕЗОТЕХНИКА—2002"**  
**17—21 сентября 2002 г.**  
**г. Тверь**

Министерство образования  
Российской Федерации,  
Научный Совет РАН

"Физика конденсированных сред"

Тверской государственный университет  
Московский институт радиотехники, электро-  
ники и автоматики (МИРЭА) — технический  
университет

Научно-исследовательский институт физики  
Ростовского государственного университета  
НИИ "Пьезоприбор"

тел. (0822)361493, доб 108,

E-mail: piezo@tversu.ru

сайт в Интернете <http://www.tversu.ru/segneto/>

## Организационный комитет

Сахненко В. П. (НИИ физики РГУ) — председа-  
тель, Педько Б. Б. (ТвГУ, Тверь) — зам. председа-  
теля, Пугачев С. И. (СПбГМТУ, г. С.-Петербург), Па-  
нич А. Е. (НКТБ "Пьезоприбор" РГУ), Кербель Б. М.  
(Томский политехнический институт), Иванов  
В. В. (ТвГУ, Тверь), Парфенов Б. Г. (ОАО "Элпа",  
г. Зеленоград), Мокров Е. А. (НИИ физических  
измерений, г. Пенза), Сафронов А. Я. (ОАО "Элпа",  
г. Зеленоград), Лучников А. П. (МИРЭА, г. Москва)

## Программный комитет

Сигов А. С. (МИРЭА, г. Москва) — председатель,  
Иванов В. В. (ТвГУ, г. Тверь) — зам. председателя,  
Большакова Н. Н. (ТвГУ, г. Тверь) — ученый секре-  
тарь, Баженов А. А. (РФЯЦ-ВНИИФЭ, г. Арзамас),

Трофимов А. И. (г. Обнинск), Резниченко Л. А.  
(НИИ физики РГУ, г. Ростов-на-Дону), Леманов  
В. В. (Физико-технический институт, г. С.-Петер-  
бург), Турик А. В. (РГУ, г. Ростов-на-Дону), Бого-  
молов А. А. (ТвГУ, г. Тверь), Дрожжев В. В. (МИРЭА,  
г. Москва)

Международная научно-практическая конфе-  
ренция "Фундаментальные проблемы пьезоэлек-  
трического приборостроения (Пьезотехника —  
2002) состоится с 17 по 21 сентября 2002 г. в  
г. Твери параллельно с XVI Всероссийской кон-  
ференцией по физике сегнетоэлектриков  
(ВКС-XVI) (с участием зарубежных ученых).  
Официальный язык конференции — русский.

## Научная программа предполагает проведение пленарных докладов (до 40 мин), оригинальных сообщений (до 15 мин) и стендовых докладов по следующим основным направлениям:

1. Теоретическое моделирование и проекти-  
рование пьезоэлектрических преобразователей,  
приборов и устройств.
2. Различные аспекты прикладного использо-  
вания материалов для устройств пьезотехники.
3. Теоретические и экспериментальные ис-  
следования по физике пьезоматериалов, процес-  
сов поляризации и технологии получения пьезо-  
материалов.
4. Специализированное оборудование для ис-  
следования и аттестации пьезоматериалов, дат-  
чиков и пьезопреобразователей.
5. Датчиково-преобразующая аппаратура, при-  
боры неразрушающего контроля, фильтры, при-  
воды, пьезодвигатели, пьезотрансформаторы,  
ультразвуковые системы, устройства медицин-  
ской и бытовой техники.
6. Новые направления пьезотехники (интел-  
лектуальные материалы, гибридные структуры,  
нетрадиционные пьезоэлектрические системы,  
нанотехнология и др.).
7. Выставка пьезоэлектрической продукции  
(материалов, технологий, активных элементов,  
приборов, устройств и т. д.).

## XVI Всероссийская конференция по физике сегнетоэлектриков

(ВКС-XVI)

17—21 сентября 2002 г.

г. Тверь

Министерство образования Российской Федерации,  
Научный Совет Российской Академии наук  
"Физика конденсированных сред",  
секция "Физика сегнетоэлектриков и диэлектриков",  
Тверской государственный университет,  
Московский институт радиотехники, электроники  
и автоматики (МИРЭА) — технический  
университет  
тел (0822)361493, доб 108, E-mail: VKS16@tversu.ru  
сайт в Интернете <http://www.tversu.ru/segneto/>

### Организационный комитет

К. С. Александров (Красноярск) — председа-  
тель, В. В. Иванов (Тверь) — зам. председателя,  
И. Н. Чугуева — ученый секретарь, А. А. Богомо-  
лов (Тверь), Т. Р. Волк (Москва), С. А. Гриднев  
(Воронеж), В. В. Леманов (Санкт-Петербург),  
В. К. Малиновский (Новосибирск), Б. Б. Педько  
(Тверь), А. С. Сигов (Москва), Б. А. Струков (Мо-  
сква), А. В. Шильников (Волгоград), Л. А. Шувал-  
ов (Москва), В. П. Сахненко (Ростов-на-Дону).

### Программный комитет

А. С. Сигов (Москва) — председатель, А. А. Бо-  
гомолов (Тверь) — зам. председателя, Н. Н. Боль-  
шакова (Тверь) — ученый секретарь, Л. А. Шувал-  
ов (Москва), Б. А. Струков (Москва), В. В. Леманов  
(Санкт-Петербург), С. А. Гриднев (Воронеж),  
В. В. Гладкий (Москва), С. Ю. Стефанович (Мо-  
сква), Ю. А. Гороховатский (Санкт-Петербург).

XVI Всероссийская конференция по физике  
сегнетоэлектриков (ВКС-XVI) (с участием зарубеж-  
ных ученых) состоится с 17 по 21 сентября 2002 г.  
в г. Тверь. Официальные языки конференции —  
русский, английский.

Научная программа предполагает проведение  
пленарных докладов (до 40 мин), оригинальных  
сообщений (до 15 мин) и стендовых докладов по  
следующим основным направлениям:

1. Физические свойства сегнетоэлектриков.
2. Фазовые переходы и критические явления.
3. Структура и динамика кристаллической ре-  
шетки.
4. Сегнетоэлектрики — релаксаторы.
5. Низкоразмерные системы, приповерхност-  
ные явления, нанокристаллы.
6. Доменная структура и процессы переключения.
7. Физические свойства и процессы в керами-  
ческих и композиционных материалах.
8. Оптические свойства сегнетоэлектриков.
9. Реальная структура сегнетоэлектриков.

Семинар, посвященный памяти

В. М. Рудяка

## "ПРОЦЕССЫ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКАХ И СЕГНЕТОЭЛАСТИКАХ"

18—20 сентября 2002 г.

г. Тверь

Министерство образования Российской Федерации,  
Научный Совет Российской Академии наук  
"Физика конденсированных сред",  
секция "Физика сегнетоэлектриков и диэлектриков",  
Тверской государственный университет  
тел. (0822)361493, доб 108,  
E-mail" VKS16@tversu.ru (с пометкой "Семинар")  
сайт в Интернете <http://www.tversu.ru/segneto/>

### Организационный комитет

Л. А. Шувалов (Москва) — председатель, В. В.  
Иванов (Тверь) — зам. председателя, Н. Н. Боль-  
шакова — ученый секретарь, А. А. Богомолв  
(Тверь), Э. В. Бурсиан (Санкт-Петербург), С. А.  
Гриднев (Воронеж), В. В. Леманов (Санкт-Петер-  
бург), Б. Б. Педько (Тверь), Т. И. Иванова (Тверь),  
А. В. Шильников (Волгоград), В. Я. Шур (Екате-  
ринбург), А. С. Сидоркин (Воронеж).

### Программный комитет

Б. А. Струков (Москва) — председатель, А. А.  
Богомолв (Тверь) — зам. председателя, Н. Н. Боль-  
шакова (Тверь) — ученый секретарь, Л. А. Шувалов  
(Москва), В. В. Иванов (Тверь), В. В. Леманов  
(Санкт-Петербург), С. А. Гриднев (Воронеж).

Семинар "Процессы переключения в сегнето-  
электриках и сегнетоэластиках" (с участием зару-  
бежных ученых) состоится с 18 по 20 сентября 2002 г.  
в г. Тверь. Официальный язык семинара — русский.

Научная программа предполагает проведение  
пленарных докладов (до 30 мин), оригинальных  
сообщений (до 15 мин) и стендовых докладов по  
следующим основным направлениям:

1. Исследование доменной структуры и процес-  
сов переполяризации сегнетоэлектриков.
2. Исследование доменной структуры и процес-  
сов переключения сегнетоэластиков.
3. Особенности процессов переключения в сег-  
нетоэлектриках-полупроводниках.
4. Механизмы релаксационных явлений в сег-  
нетоэлектриках, сегнетоэластиках и сегнетоэлек-  
триках-полупроводниках.
5. Диэлектрическая и сегнетоупругая вязкости.
6. Использование сегнетоэлектриков и сегнето-  
эластиков в технике.

Восьмая международная научно-техническая конференция  
**"АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ  
 И МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ"**  
 (14—19 сентября 2002 г., пос. Дивноморское, Краснодарский край, Россия)

Министерство образования РФ, Государственный комитет по науке и технологиям Республики Беларусь, Международная академия информатизации, Российская академия наук, Академия инженерных наук РФ, Таганрогский государственный радиотехнический университет (ТРТУ), Московский государственный институт электронной техники (технический университет), Московский инженерно-физический институт (технический университет), Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет), НИКТП "Белмикросистемы" (г. Минск, Беларусь), НИПИ "Океангеофизика" (г. Геленджик, Россия), Северо-Кавказское отделение АИН РФ, Геленджикский филиал ТРТУ, ЛМО (Германия) проводят Международную научно-техническую конференцию "Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники" ПЭМ-2002

Конференция проводится в лечебно-оздоровительном комплексе "Голубая даль" — лучшем пансионате известного приморского климатического курорта Геленджик Краснодарского края.

**Тематика секций конференции:**

1. Фундаментальные исследования.
2. Нанозлектроника.
3. Технология микроэлектроники.
4. Материалы электронной техники.
5. Микросхемотехника.
6. Проектирование приборов и микросхем.
7. Твердотельная электроника СВЧ.
8. Микросистемная техника.
9. Планирование, менеджмент и экономика в электронике.

**Адрес оргкомитета:**

347928, Россия, Ростовская обл., г. Таганрог, ГСП-17А, пер. Некрасовский, 44, ТРТУ, деканат ФЭП;

Телефон для справок (8634) 37-17-67, факс (8634) 36-15-00;

E-mail: pem@fep.tsure.ru

<http://www.fep.tsure.ru> в разделе "Конференции" или <http://www.fep.tsure.ru/win/conferenc/index.html>



**IX Санкт-Петербургская международная конференция  
 по интегрированным навигационным системам**

27—29 мая 2002 г. в Санкт-Петербурге в ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор" под руководством акад. РАН В. Г. Пешехонова состоялась IX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Эта ежегодная конференция стала традиционным местом обмена идеями ученых и инженеров в области наведения, навигации и управления движением. Конференция проведена при поддержке Научного совета РАН по проблемам управления движением и навигации, международной общественной организации "Академия навигации и управления движением" (АНУД), Россия; Американского института авионавтики и аэронавтики (AIAA); Института инженеров-электриков и электроников (IEEE), США; Ассоциации авионавтики и аэронавтики Франции (AAAF), Французского института навигации (IFN).

**Тематика конференции**

- Интегрированные навигационные системы для морских, наземных и аэрокосмических применений
- Элементы и системы наведения, навигации и управления для движущихся объектов
- Датчики, алгоритмы и программное обеспечение
- Высокопрецизионные системы
- Влияние окружающей среды и помех
- Инерциальные и другие автономные системы
- Микромеханика и ее применение
- Применения в геодезии
- Определение пространственного местоположения
- Испытания
- GLONASS, Galileo, GPS и расширенные системы.

Информацию о конференции можно получить в ГНЦ РФ — ЦНИИ "Электроприбор":

Ул. Малая Посадская, 30, Санкт-Петербург, 197046, Россия

☎ (812) 238 82 10, (812) 238 81 57; факс (812) 232 33 76;

e-mail: elprib@online.ru;

<http://www.elektropribor.spb.ru> (раздел "Конференции")





Russian Academy of Sciences  
Ministry of Industry, Science and  
Technologies  
Institute for Problems in Mechanics

## IARP International Advanced Robotics Programme

International Workshop  
on

### Microrobots, Micromachines and Microsystems

#### First Announcement and Call for Papers and Videos

Moscow—Russia  
April 24—25, 2003

##### Honorary Chairpersons

Norman Caplan	IARP President, USA
Georges Giralt	IARP General Secretary, FRANCE
Igor Makarov	Council on Robotics and Automation, Russian Academy of Sciences, RUSSIA

##### Local Organizing Committee

##### Executive Co-Chairmen:

D. Klimov	Russian Academy of Sciences
V. Gradetsky	IPM RAS

##### Members:

M. Ananjan	Nanotechnology Institute
V. Aristov	Microsystem Technology
F. Chernousko	IPM RAS
V. Gnedenko	New Technologies Centre
I. Kaljaev	Institute of multiprocessor systems
V. Luchinin	St-Petersburg Electromechanical University, Microtechnology Centre
P. Maltsev	Microsystems Engineering
D. Okhotsimsky	Keldysh Institute of Applied Mathematics, RAS
V. Rakhovsky	Antech Ltd.
V. Stepanov	MNTK "Robot"
A. Vasiliev	Ministry of Industry, Science and Technologies
V. Verner	Technological Centre, Scientific and Manufacturing Complex

##### Topics

Specific topics include but are not limited to:

- **Micromachine, microrobots and systems, including the fields of:**
  - microsensors, microactuators, micromotors, micro-control
  - integration of mechanical and electrical micro components
  - power supply for micro robots and micro machines
  - information telecommunication
  - micro kinematics, dynamics, micro friction and lubrication
  - 3D fabrication of micromechanical components.
- **System technology for microrobots and micromachines, especially on:**
  - high resolution measurement instrumentation for high precision positioning and microforce sensing
  - active vision for focus and occultation adaptation
  - micro-tools, micro-grippers and physical effects related to micron-sized part capture and release
  - control strategies included micro-telemanipulation
  - user interfaces to the microscopic world
  - simulation and method of virtual reality
  - multi agency co-ordinating control for multi micro robots.
- **Microelectronic mechanical systems MEMS and MOEMS, there existing and potential applications in:**
  - medical intervention, bioengineering
  - navigation and motion control
  - nuclear power station, industrial inspection
  - assembly and manufacturing and so on.
- **Microrobots and artificial intelligent behaviour.**
- **Microtechnologies and nanotechnologies — present and the future**
- **Nanotechnologies and nanodevices: tendency of research, development and application.**

##### Time schedule

An abstract (approximately 600 words in English) should be received not later than **August 15th, 2002.**

Submission of Abstracts:	August 15th, 2002
Notification of acceptance:	October 1st, 2002
Submission of camera ready papers:	December 1st, 2002
Invitation of participants:	February 1st, 2003

##### Workshop information and inquiries

Submission of the abstracts, Papers and Videos to the address: Workshop "Microrobots, micromachines and systems".

The Institute for Problems in Mechanics Russian Academy of Sciences, Prospect Vernadskogo, 101-1, 117526 Moscow, Russia.

Electronic submissions of the abstracts (Word 97, PS-format, PDF-files) should be mailed to: gradet@ipmnet.ru

Workshop information and Inquiries: Dr. Sergei Kalinichenko Tel.: (7095) 4337766; Fax: (7095) 938-20-48; e-mail: kalinit@ipmnet.ru