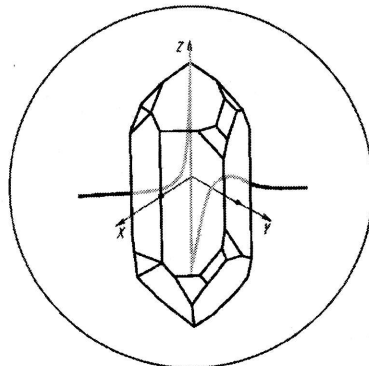


РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК



# ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Материалы Международной научно-технической  
конференции «**INTERMATIC – 2013**»  
2 – 6 декабря 2013 г., Москва

Под редакцией  
академика РАН А.С. Сугова

Часть 3

Москва – 2013

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ  
ПРОБЛЕМЫ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО  
ПРИБОРОСТРОЕНИЯ**

**Материалы Международной научно-технической  
конференции «INTERMATIC – 2013»  
2–6 декабря 2013 г., Москва**

Под редакцией  
академика РАН А.С. Сизова

**Часть 3**

**FUNDAMENTAL PROBLEMS  
OF RADIOENGINEERING AND DEVICE  
CONSTRUCTION**

**Proceedings of the International Scientific and  
Technical Conference «INTERMATIC – 2013»  
December 2–6, 2013, Moscow**

Edited by A. Sigov

**Part 3**

**Москва - 2013**

УДК 539.1: 621.315.5: 621.382:

**Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения** / Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC-2013», 2–6 декабря 2013 г., Москва. / Под ред. академика РАН А.С. Сигова. – М.: Энергоатомиздат, 2013, часть 3. – 216 с.

**ISBN 978-5-2830-3352-5**

В настоящий сборник включены материалы Международной НТК «INTERMATIC-2013», отражающие новые результаты научных и инженерных исследований в области радиоэлектронного приборостроения.

Сборник рассчитан на специалистов в области физической электроники и технологии радиоэлектронного приборостроения. Он также может быть использован преподавателями, аспирантами и студентами при изучении соответствующих курсов.

В настоящий сборник также включены соответствующие теме материалы V Всероссийской научно-технической школы-конференции молодых ученых «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения – 2013», 3–6 декабря 2013 г., Москва.

Выполнено при финансовой поддержке РФФИ

**Редакционная коллегия:**

Ю.В. Гуляев (председатель), А.С. Аджемов, К.А. Воротилов,  
П.А. Лучников, И.В. Соловьев, С.А. Никитов, В.Г. Орлов,  
А.С. Сигов (ответственный редактор)

**Научное издание**

Редактор – *А.П. Лучников*  
Компьютерная верстка – *Д.С. Серегин*

ОАО издательство «Энергоатомиздат», 107031, Москва, ул. Рождественка, 5/7

Подписано в печать с оригинал-макета 26.11.2013 г.  
Формат 84x108/16. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 24,95. Уч.изд. л. 23,76.  
Тираж 150 экз.

Отпечатано в типографии ООО «Галлея-Принт»

**ISBN 978-5-2830-3352-5**

© Энергоатомиздат,  
МГТУ МИРЭА,  
ИРЭ РАН,  
2013

***ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ:***

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ**

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК**

**РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ**

**ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ РАН  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ РАДИОТЕХНИКИ, ЭЛЕКТРОНИКИ  
И АВТОМАТИКИ**

**МОСКОВСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ СВЯЗИ  
И ИНФОРМАТИКИ**

***ПРИ УЧАСТИИ:***

**ГОМЕЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИМ. Ф. СКОРИНЫ**

**НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО  
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК  
ЖУРНАЛА «НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОСТРУКТУРЫ»**

**ЖУРНАЛА «НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ»**

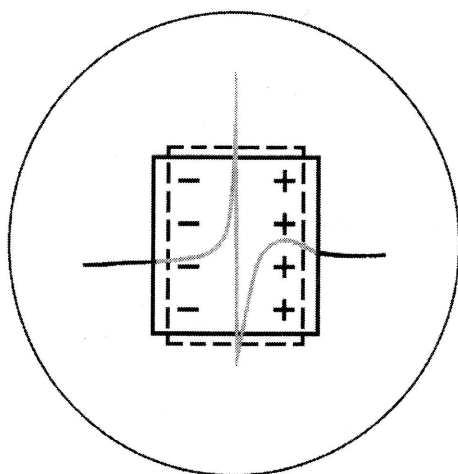
**ЖУРНАЛА «РАДИОТЕХНИКА»**

## ОРГКОМИТЕТ

Гуляев Ю.В.	- (Россия) - председатель
Сигов А.С.	- (Россия) - зам. председателя
Аджемов А.С.	- (Россия) - зам. председателя
Лучников П.А.	- (Россия) - ученый секретарь
Балыхин Г.А.	- (Россия)
Бержанский В.Н.	- (Украина)
Ибраев Н.Х.	- (Казахстан)
Камильджанов Б.И.	- (Узбекистан)
Кудж С.А.	- (Россия)
Перно Ф.	- (Франция)
Рогачев А.В.	- (Беларусь)
Скотт Дж.	- (Великобритания)

## *ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ*

Никитов С.А.	— председатель,
Орлов В.Г.	— ученый секретарь,
Безруков В.Н.,	Воротилов К.А.,
Есаулов Н.П.,	Мальцев П.П.,
Крашенинников А.И.,	Лось В.П.,
Морозов А.И.,	Нефедов В.И.,
Ивашов Е.Н.,	Пронин И.П.,
Резниченко Л.А.,	Санников В.Г.,
Сидорин В.В.,	Соколов В.В.,
Соловьев И.В.,	Суржиков А.П.,
Фетисов Ю.К.,	Шаврин С.С.



# Приборы и компоненты РЭА

48. <b>Шиманович Д.Л.</b> Электрохимический синтез свободных двухслойных $Al_2O_3$ -пластин для СВЧ-систем .....	182
49. <b>Шиманович Д.Л.</b> Методы создания встроенных алюминиевых коммутационных элементов в объеме свободных анодных $Al_2O_3$ -оснований .....	186
50. <b>Терентьев Д.А.</b> Методика измерения тепловых деформаций катодного узла и настройки магнитной системы для клистронов миллиметрового диапазона .....	190
51. <b>Ивашов Е.Н., Федотов К.Д.</b> <u>Применение тепловых трубок в туннельной микроскопии</u> .....	194
52. <b>Ивашов Е.Н., Князева М.П.</b> Поперечные и продольные колебания пьезопривода при формировании квантовых точек .....	198
53. <b>Гавриш С.В.</b> Короткодуговые ксеноновые лампы сверхвысокого давления с сапфировой оболочкой .....	205
54. <b>Гавриш С.В., Герасимов М.Ю., Сурдо А.В., Шерстнев Д.В.</b> Диагностика теплового состояния сапфировых оболочек разрядных ламп специального назначения .....	208

---

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ТРУБОК В ТУННЕЛЬНОЙ МИКРОСКОПИИ

© 2013 г. Е.Н. ИВАШОВ, К.Д. ФЕДОТОВ

Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ  
e-mail: ienmiem@mail.ru

Тепловые трубки позволяют отводить от рабочей зоны тепловые потоки высокой плотности (порядка нескольких киловатт на квадратный сантиметр) и – главное, с высокой скоростью, ограниченной лишь скоростью звука для газа внутри тепловой трубки.

Рассмотрим модификации устройств с помощью тепловых трубок на примерах устройств наноперемещения зонда.

Устройство наноперемещений зонда (Рис. 1) содержит пьезопривод 1, выполненный из набора пьезоколец 2, между которыми расположены металлические кольца 3, тепловую трубку 4, закрепленную на свободном торце пьезопривода 1, зонд 5, установленный в тепловой трубке 4 и взаимодействующий с подложкой 6, тепловая трубка 4 связана с источником жидкого азота 7.

Устройство наноперемещений зонда работает следующим образом.

При подаче напряжения на металлические кольца 3, происходит механическая деформация пьезопривода 1 из набора пьезоколец 2 вследствие обратного пьезоэффекта, при этом тепловая трубка 4, жестко связанная со свободным торцом пьезопривода 1, выполняет перемещение зонда 5 перпендикулярно подложке 6, в результате сил электрического взаимодействия зонда 5 и подложки 6 выполняется технологический процесс, при этом тепло из рабочей зоны зонда 5 тепловой трубки 4 к источнику жидкого азота 7.

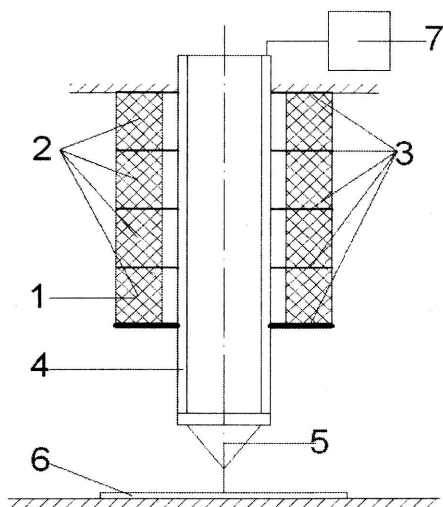


Рис. 1. Устройство наноперемещений зонда.

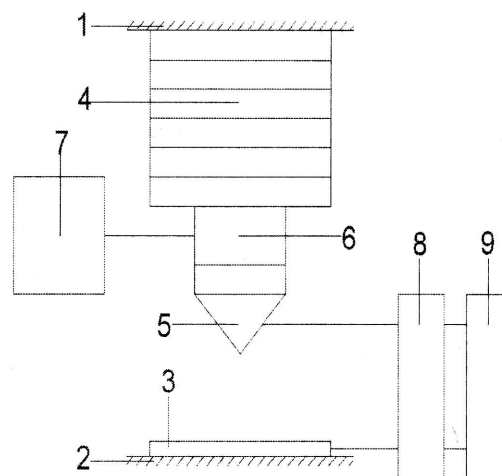


Рис. 2. Пьезопривод с тепловой трубкой.

Пьезопривод с тепловой трубкой (Рис. 2) содержит неподвижную направляющую 1, стол 2, на котором установлена подложка 3, пьезоэлектрический преобразователь 4, жестко связанный с неподвижной направляющей 1, зонд 5, жестко связанный с торцом



тепловой трубки 6, которая в свою очередь жестко связана со свободным торцом пьезоэлектрического преобразователя 4, а так же связана с узлом подачи хладагента, дополнительно зонд 5 и подложка 3 связаны с усилителем сигналов 8 и блоком измерения 9.

Пьезопривод с тепловой трубкой работает следующим образом.

При подаче напряжения на пьезоэлектрический преобразователь 4, зонд 5 перемещается перпендикулярно подложке 3 и выполняет технологический процесс. Вследствие действия эффекта Зеебека, в термопаре подложка-зонд начинает действовать ТЭДС, которую усиливает усилитель сигнала 8 и передает в блок измерения 9, который регистрирует температуру рабочей зоны. Отвод тепла от рабочей зоны и зонда 5 осуществляется посредством тепловой трубки 6, соединенной с узлом подачи хладагента 7.

Для проектирования тепловых трубок и последующего их введения в нанотехнологические устройства, необходимо описать процессы, позволяющие достигать высокой эффективности теплоотвода.

Представим математически процесс переноса энергии и вещества в условиях ламинарного несжимаемого потока пара внутри цилиндрической тепловой трубы.

Запишем уравнения переноса пара:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{v} &= 0, \\ \rho_n \vec{v} (\nabla \vec{v}) &= -\nabla P_n + \eta_n \nabla \vec{v}, \\ c_p \rho_n \nabla T_n &= \lambda \nabla^2 T_n, \end{aligned}$$

здесь  $v$  – скорость переноса пара,  $\rho_n$  – плотность пара,  $P_n$  – давление пара,  $\eta_n$  – динамическая вязкость пара,  $T_n$  – температура пара,  $c_n$  – теплоемкость пара,  $\lambda$  – теплопроводность пара, описание  $\nabla$  дано ниже.

Уравнения переноса энергии в пористом фитиле, насыщенном конденсатом

$$\begin{aligned} c_{ж} \Pi V_{ж} \rho_{ж} \nabla T_{ж} &= \operatorname{div} \vec{q}, \\ q &= \Lambda \operatorname{grad} T, \end{aligned}$$

здесь  $c_{ж}$  – теплоемкость жидкости,  $\Pi$  – пористость фитиля,  $V_{ж}$  – объем жидкости,  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости,  $T_{ж}$  – температура жидкости,  $q$  – плотность теплового потока. Так же введен  $\Lambda$  – тензор теплопроводности капиллярно-пористого фитиля, насыщенного жидкостью, так как теплопроводность в осевом направлении фитиля отличается от его теплопроводности в радиальном направлении

$$\nabla^2 = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

Данная система из шести уравнений в общем случае описывает перенос тепловой энергии во внутреннем пространстве трубки, а именно в артерии и фитиле. Для полного описания переноса тепла необходимо дополнить данную систему уравнениями переноса тепла в оболочке трубы, а так же уравнениями фильтрации жидкости в капиллярно-пористой среде фитиля.

Максимальное капиллярное давление, развиваемое в пористом фитиле, имеющем эффективный размер пор  $r_3$

$$P_k^{max} = \frac{2\sigma \cos \theta}{r_3}.$$

Перенос ламинарного потока жидкости в пористом фитиле в зависимости от вида фитиля определяется либо по закону Дарси (для жидкостей, подчиняющихся закону Навье-Стокса)

$$\begin{aligned} -\nabla P - \frac{\eta}{K} \vec{u} + \rho \vec{f} &= 0, \\ \operatorname{div} \vec{u} &= 0, \end{aligned}$$

либо Пуазейля (одно из самых простых точных решений уравнений Навье-Стокса).

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta l} (P_1 - P_2) = \frac{\pi d^4}{128\eta l} \Delta P,$$

Кроме поля капиллярных сил на перенос жидкости оказывает влияние гравитационное поле, поэтому в выражение для определения  $\Delta P_{\text{ж}}$  необходимо ввести член  $\rho_{\text{ж}} g z \sin \alpha$ .

Кинетика фазового перехода жидкость-пар, т.е. скорость испарения и конденсации, может быть определена с помощью критерия  $Kn$  (число Кнудсена). Максимальный тепловой поток при испарении с плоской поверхности в вакуум

$$q_{\text{max}} = f \frac{LP_{\text{ж}}}{\sqrt{2\pi R_0 T_{\text{ж}}/\mu}}$$

$R_0$  – универсальная газовая постоянная,  $L$  – скрытая теплота парообразования. В ряде случаев перенос энергии и вещества в тепловых трубах может происходить при частичном осушении пористого фитиля.

В итоге расчет тепловой трубы основывается на уравнениях динамики потока жидкости и пара, описании кинетики фазовых переходов на поверхности раздела жидкость-пар, а так же уравнениях переноса энергии в артерии трубки, в капиллярно-пористой части (фитиле) и в самой оболочке трубы.

Поток жидкости в пористом теле фитиля должен быть более подробно, он может быть описан законом Дарси.

$$m = \rho_{\text{ж}} V_{\text{ж}} = - \frac{K_{\text{ж}}}{\mu_{\text{ж}}} \text{grad} P,$$

Проинтегрировав это уравнение, получаем перепад давления в двух точках фитиля. Проницаемость  $K_{\text{ж}}$  зависит от пористости  $\Pi$  фитиля и степени его насыщения жидкостью  $b_{\text{ж}}$

$$K_{\text{ж}} = f(\Pi, b_{\text{ж}}),$$

При больших тепловых нагрузках насыщенность пористого фитиля жидкостью зависит от координаты. Пористый материал может быть охарактеризован следующими параметрами: размером пор  $d$ ; линейным размером  $l$  пористого тела. В пределах этого размера берется осреднение  $\langle w \rangle$  по объему пористого тела.

Средняя объемная величина какой-то функции  $\Psi$  тензорного типа, характеризующей жидкость в пористом материале, определяется соотношением

$$\langle \Psi \rangle = \frac{1}{V} \int \Psi dV, \text{ при } d \ll l, l - \text{ характеристическая длина объема } V;$$

Основное усредненное соотношение для характеристики жидкости в пористом теле имеет вид

$$\langle \text{grad} \Psi \rangle = \text{grad} \langle \Psi \rangle + \frac{1}{V} \int_{S_i} \bar{\Psi} n^1 dS,$$

поверхностный интеграл берется вдоль поверхности жидкости  $S_i$  в зоне поверхности раздела жидкость – пар в объеме пористого фитиля;  $n^1$  - единичный вектор по нормали к поверхности элемента  $dS$ .

Это уравнение необходимо для вывода уравнения движения жидкости в пористом теле.

Третьей характеристикой пористого тела является дифференциальная кривая распределения поверхностной проницаемости  $f(K)$  (подобно кривой распределения пор по радиусу).

Для однородного материала такая кривая может быть представлена как дельта функция  $K$  или линейная комбинация этих функций.

$$f(K) = \sum_{i=1}^N \delta A_i, A_i \text{ удовлетворяет условию } \sum_{i=1}^N A_i = 1, N \text{ конечно.}$$

Если  $f(K)$  не может быть представлена как конечное число функций, то материал неоднородный.

Если  $f(K)$  представлена одним членом – материал гомогенный.

Если материал описывается двумя или более функциями  $f(K)$  то он гетерогенный.

Если  $f(K)$  зависит от прямоугольных координат  $x_i$  ( $i=1,2,3$ ) и угловых координат  $\Psi$ ,  $\theta$ , то пористый материал является анизотропным. Если отсутствует зависимость от угловых координат – материал изотропный

$$P(K_1 \leq K \leq K_2) = \int_{K_1}^{K_2} f(x_i \theta \Psi) dx_i d\theta d\Psi.$$

В качестве теплоносителя в тепловых трубках можно применять множество жидкостей с низкой температурой испарения.

Из всего перечня наивысшая теплота испарения, у самой распространенной жидкости - воды. Это наиболее эффективный теплоноситель работающий на испарение при реальных температурах в электронной аппаратуре.

Следует отметить, что существуют современные компьютерные методы проектирования и анализа, которые могут быть применимы к задачам создания как отдельных тепловых трубок для нанотехнологических устройств, так и для проектирования этих устройств в целом.

Например, для расчета и описания течения ламинарного потока газа через артерию тепловой трубки может быть использован метод конечных объемов (МКО), развиваемый более 40 лет.

Для описания потока некоторой величины  $\varphi$  в объеме  $\Omega$ , ограниченном поверхностью  $S$  с внешней нормалью  $\vec{n}$ , используется уравнение баланса.

В качестве  $\varphi$  можно в данном случае использовать внутреннюю энергию газа в артерии тепловой трубки. Существует несколько методов аппроксимации интегралов, но при использовании МКО сложно добиться точности численной схемы выше второго порядка.

Используя МКО возможно моделирование течения потока газа через артерию тепловой трубки, но остается открытым вопрос моделирования переноса энергии в пористом фитиле. Одним из новых методов моделирования динамических задач механики является метод подвижных клеточных автоматов (МПКА).

Для описания перемещения и поворота автоматов применяются уравнения механики Ньютона-Эйлера. В данном методе используются тензорные уравнения для описания поступательного, вращательного движений автоматов и их линейных деформаций.

Данный метод объединяет возможности методов молекулярной динамики и клеточных автоматов. Его ценность заключается в том, что с его помощью можно напрямую учитывать такие события в пористом фитиле как: перемешивание масс, эффект проникновения, фазовые превращения, капиллярное течение.

В заключении следует отметить, что существует фундаментальная теоретическая база для расчета тепловых трубок, а так же машинные приложения в виде метода конечных объемов и метода подвижных клеточных автоматов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Васильев Л.Л. и др.* Низкотемпературные тепловые трубы. // *Васильев Л.Л., Вааз С.Л., Киселев В.Г., Конев С.В., Гракович Л.П.*; Мн., «Наука и техника», 1976, 136 с.
2. *Головин Ю.И.* Введение в нанотехнологию. - М.: «Изд-во Машиностроение-1», 2003, 112 с.
3. *Андреевский Р.А.* Наноструктурные материалы – состояние разработок и применение. // *Перспективные материалы.* 2001. № 6.
4. Патент РФ на ПМ № 30032, КЛ 7 Н 01 L 41/00, 10.06.2003.
5. Патент РФ на ПМ № 40549, МПК 7 Н 02 N 2/00, 10.09.2004.
6. *Федотов К.Д.* Трехкоординатный пьезопривод для сканирующей туннельной микроскопии [Текст] / *Е.Н. Ивашов, К.Д. Федотов* // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения (INTERMATIC – 2012)* : матер. XI Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 3-7 дек. 2012 г. – М.: МИРЭА, 2012. – Ч. 3. – С. 165-168.