

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ**

УДК 539.371;538.911

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ
МИКРОМЕХАНИЧЕСКИМ УСТРОЙСТВОМ
С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ**

© 2015 г. П. В. Лега¹, В. В. Коледов¹, Д. С. Кучин¹, П. В. Мазаев¹, А. М. Жихарев¹,
А. В. Маширов¹, В. С. Калашников¹, С. А. Зыбцев¹, В. Я. Покровский¹,
В. Г. Шавров¹, В. А. Дикан², Л. В. Коледов³, А. В. Шеляков⁴, А. В. Иржак⁵

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Российская Федерация, 125009 Москва, ул. Моховая, 11, стр. 7

²Национальный исследовательский технологический университет МИСИС,
Российская Федерация, 119991 Москва, Ленинский просп., 4

³Донской государственный технический университет,
Российская Федерация, 344000 Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

⁴Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,
Российская Федерация, 115409 Москва, Каширское шос., 31

⁵Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН,
Российская Федерация, 142432 Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, 6

E-mail: shavrov@cplire.ru, victor_koledov@mail.ru

Поступила в редакцию 22.12.2014 г.

В последнее время доказано, что эффект памяти формы (ЭПФ) в сплавах, например на основе Ti–Ni, сохраняется вплоть до нанометрового масштаба размеров активного слоя сплава, продемонстрированы рекордные по миниатюрности, действующие микро- и наномеханические устройства: актюаторы и нанопинцеты, выполненные по стандартным технологиям микроэлектроники на основе композитов с ЭПФ. Это позволяет надеяться на создание в ближайшем будущем следующего поколения микро- и наномеханических устройств с размерами, вполне сравнимыми, например, с углеродными нанотрубками, графеновыми листами, вирусами и др. В данной работе методами математического моделирования изучается способ активации микромеханических устройств с ЭПФ при помощи резистивного импульсного нагрева. Показано, что при уменьшении габаритов нагревательного элемента от 1 мм до 10 мкм быстродействие резко увеличивается от 10^2 до 10^5 с⁻¹, а энергопотребление одновременно уменьшается от 10^{-3} до 10^{-8} Дж на одну операцию. Обсуждаются предварительные эксперименты по отработке управления композитным нанопинцетом с ЭПФ при помощи технологии автоматизированного импульсного нагрева, а также перспективы создания быстродействующих высокопроизводительных микроробототехнических систем на основе новой элементной базы.

DOI: 10.7868/S0033849415100083

ВВЕДЕНИЕ

Успехи в области создания новых материалов в последние годы стимулируют быстрый прогресс в самых разнообразных отраслях микроэлектроники и микросистемной техники. Сплавы с эффектом памяти формы (ЭПФ) представляют важный класс функциональных материалов, которые обеспечивают гигантские – до 10% деформации, управляемые нагревом. Технология сплавов с ЭПФ в последние годы быстро развивается. В частности, показано, что создание наноструктуры существенно повышает как эксплуатационные, так и функциональные свойства сплавов с ЭПФ [1].

Продемонстрирована возможность управления ЭПФ в ферромагнитных сплавах при постоянной температуре за счет включения/выключения магнитного поля [2–7]. В последнее время доказано также, что ЭПФ в сплавах, например, таких как Ti–Ni, Ti–Ni–Cu, Ni₂MnGa, сохраняется вплоть до субмикро- и нанометрового масштаба размеров активного слоя сплава [8–16]. По стандартным технологиям локального ионного травления и ионно-стимулированного осаждения из газовой фазы созданы рекордные по миниатюрности микро- и наномеханические устройства – нанопинцеты с ЭПФ. Их работоспособность успешно

продемонстрирована в процессе манипулирования реальными микро- и нанообъектами, такими как углеродные нанотрубки, стопки графеновых слоев, микро-биоволокна и частицы.

В данной работе методами математического моделирования изучается способ активации микромеханических устройств с ЭПФ нового поколения при помощи резистивного импульсного нагрева. Цель работы – исследовать энергетические и временные характеристики системы управления в зависимости от масштаба размеров системы нагрева, а также экспериментально испытать прототип системы автоматизированного управления микромеханическим устройством при помощи импульсного нагрева и обсудить перспективы создания быстродействующих высокопроизводительных микроробототехнических систем на основе новой элементной базы.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИМ УСТРОЙСТВОМ С ЭПФ

А. Физическая модель процесса управления

Цель моделируемой системы – управление микромеханическим устройством – нанопинцетом, описанным в работах [8–16]. Нанопинцет включает биметаллический композит, состоящий из слоя с ЭПФ и упругого слоя. Главный физический эффект, лежащий в основе любого устройства с ЭПФ – термоупругое мартенситное превращение первого рода. При прямом мартенситном переходе охлаждение переводит кубическую высокотемпературную фазу сплава – аустенит в низкосимметричную низкотемпературную фазу – мартенсит. Термоупругому мартенситному превращению, как и всякому фазовому превращению первого рода, присущ температурный гистерезис. Приняты следующие обозначения: M_s, M_f – температуры начала и конца прямого мартенситного перехода, A_s, A_f – обратного мартенситного перехода. В данной работе применяется сплав Ti_2NiCu , для которого $M_s = 42^\circ C, M_f = 39^\circ C, A_s = 50^\circ C, A_f = 52^\circ C$ [16].

Нанопинцет пренебрежимо малого размера и теплоемкости расположен на заостренном конце конической микропровода (рис. 1). Толщина тонкого конца микропровода 1 мкм и менее, толстого конца – 0.5 мм, длина проволоки $L \approx 1$ см. Тонкий конец лишен теплоотдачи, так как нанопинцет расположен в вакууме. Толстый конец проволоки поддерживается при постоянной (комнатной) температуре T_0 . Резистивный нагреватель, например диод или терморезистор, имеет длину h и расположен на расстоянии L_2 от острого конца и, таким образом, минимальное расстояние от заостренного конца проволоки до нагревателя

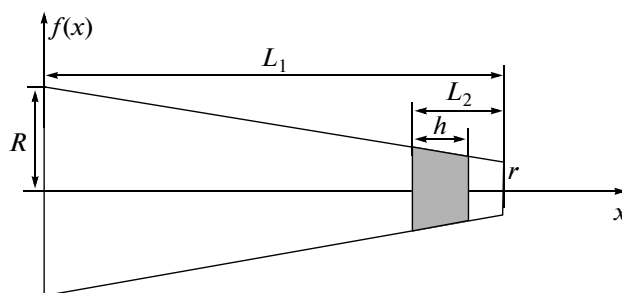


Рис. 1. Модель процесса управления микроустройством с ЭПФ. Нагреватель выполнен в форме конической иглы с резистивным нагревательным элементом вблизи ее тонкого конца: R – радиус толстого конца иглы, r – радиус тонкого конца иглы, L_1 – длина иглы, L_2 – расстояние от начала нагревателя до конца иглы, h – длина резистивного нагревателя. При масштабировании модели системы нагрева применяется соотношение $L_2 = 2h$.

составляет $L_1 - h$. Теплоемкостью нагревателя также пренебрегаем.

Критерий срабатывания (замыкания) нанопинцета – нагрев тонкого конца микропровода выше температуры конца перехода мартенсит-аустенит сплава с ЭПФ $T_1 > A_f$. Критерий размыкания – это снижение температуры острого конца микропровода ниже температуры конца перехода аустенит-мартенсит сплава с ЭПФ $T_2 < M_f$ (см. более подробно [13, 14]). Принято технологическое ограничение температуры по всей длине нагревателя $T < 400$ К.

Б. Обобщенная одномерная задача теплопередачи по стержню с переменным сечением

Запишем дифференциальное уравнение теплопроводности, исходя из уравнения баланса энергии [17, 18].

$$\rho C f(x) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} f(x) \right) + q(x), \quad (1)$$

$$f(x) = \pi \left(\frac{R-r}{L_1} x + R \right)^2, \quad (2)$$

где C – теплоемкость, ρ – плотность, λ – теплопроводность материала иглы, R – радиус толстого конца иглы, r – радиус тонкого конца иглы, $f(x)$ – сечение конической иглы, как функция координаты x . Источник нагрева – диод или терморезистор. В расчете источник нагрева моделируется областью иглы длиной h , в которой однородно по длине иглы выделяется удельная тепловая мощность – q (рис. 2). Таким образом, $P = qh$ – полная мощность нагре-

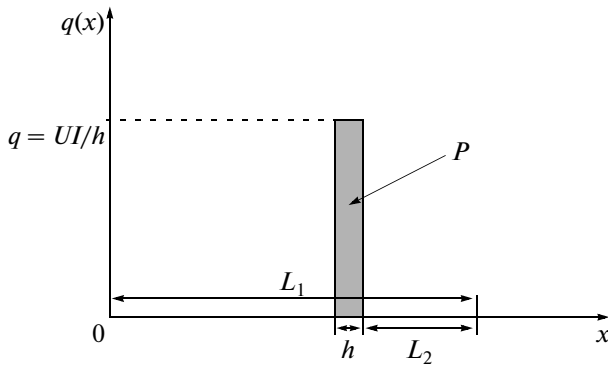


Рис. 2. Зависимость плотности мощности нагрева $q(x)$ от координаты x . $P = UI$ – мощность нагревательного элемента, h – длина нагревательного элемента; L_1 – длина иглы, I – ток, протекающий через нагревательный элемент, U – напряжение на нем.

вателя. После подстановки (2) в (1) и дифференцирования получаем:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \left[\frac{2(R-r)}{(R-r)x + RL_1} \right] + \frac{q(x)}{\pi \left(\frac{R-r}{L_1} x + R \right)^2}. \quad (3)$$

Граничные условия следующие:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \text{ при } x = L_1, \quad (4)$$

$$T(x=0) = T_0, \quad (5)$$

начальное условие –

$$T(x, t=0) = T_0. \quad (6)$$

При расчете принято, что материал микропровода – вольфрам: $C = 134$ Дж/(кг К) – теплоемкость, $\rho = 19250$ кг/м³ – плотность, $\lambda = 162.8$ Вт/(м К) – теплопроводность вольфрама, $R = 0.25 \times 10^{-3}$ м – радиус толстого конца иглы, $r = 0.5 \times 10^{-6}$ м – радиус тонкого конца иглы, $L_2 = 2h$ – расстояние от начала нагревателя до конца иглы (h – длина нагревателя), $L = 10^{-2}$ м – длина иглы, P – мощность нагревателя, $T_0 = 293.15$ К.

В ходе расчета согласно физической модели предполагалось, что

1) будет рассчитано распределение температуры от координаты и времени, как функция мощности P нагревателя, и определено минимальное время нагрева теплоизолированного тонкого кончика иглы нагревателя до температуры срабатывания нанопинцета $T_1 = 350$ К и его остывания до температуры размыкания $T_2 = 320$ К. Начальные условия – проволока находится при температуре $T_0 = 293.15$ К, нанопинцет разомкнут;

2) расчет проводится для разных значений h , причем геометрия задачи пропорционально масштабируется, так что при изменении масштабного параметра h расстояние от конца площадки нагревателя до острого конца проволоки остается равным ширине нагревательного элемента h и, таким образом, $L_2 = 2h$;

3) импульс тока одиночный;

4) результатом расчета являются зависимости времени срабатывания нанопинцета $t_{\text{имп}}$ и энергии $W = Pt_{\text{имп}}$, от масштабного параметра h , при различных масштабах от $h = 10^{-3}$ м до $h = 10^{-5}$ м;

5) в задаче принято технологическое ограничение на мощность нагревателя, которое следует из того, что температура нагревателя не может превышать 400 К. Это ограничение характерно для кремниевых диодов и некоторых других материалов электронной технологии. Максимальная мощность, для которой это условие выполняется, также определялась в ходе численного моделирования.

В. Результаты численного расчета

Расчеты проводились с помощью программных пакетов Matlab и Comsol и дали приближенно одинаковые результаты.

Результаты численного расчета представлены в виде графиков, отражающих зависимости температуры иглы нагревателя как функции координаты для разных временных сечений. На рис. 2 представлено семейство зависимостей температуры от координаты для $h = 1000$ мкм, $L_2 = 2000$ мкм, $P = 285$ мВт при $t = 0 \dots 3.5$ мс. Выключение нагрева определяется по достижении температуры на нагревателе $T = 395$ К. Это отвечает моменту времени $t_{\text{имп}} = 6.5$ мс (рис. 3, кривая 5). После прекращения нагрева при $t > t_{\text{имп}} = 6.5$ мс (рис. 3, кривые 6–10) температура нагревательного элемента снижается, а температура кончика повышается до 386 К, а затем охлаждается до 320 К в момент времени $t = t_{\text{п}} = 35$ мс (т.е. проходит полный цикл сжатие–размыкание). Таким образом, время сжатия нанопинцета, т.е. время, за которое кончик иглы нагревается до $T = 386$ К составляет $t_{\text{имп}}$, а время размыкания нанопинцета, т.е. время, за которое кончик иглы охлаждается до $T = 320$ К, составляет $t_{\text{п}}$. Мощность подбиралась таким образом, чтобы срабатывание нанопинцета достигалось за наименьшее время, но при этом не нарушалось технологическое ограничение на максимальную температуру нагревательного элемента.

На рис. 4 представлено семейство зависимостей температуры от координаты для $h = 100$ мкм, $L_2 = 200$ мкм, $P = 30$ мВт при $t = 0 \dots 440$ мкс. В результате расчета найдено, что $t_{\text{имп}} = 83$ мкс, $t_{\text{п}} = 44$ мкс.

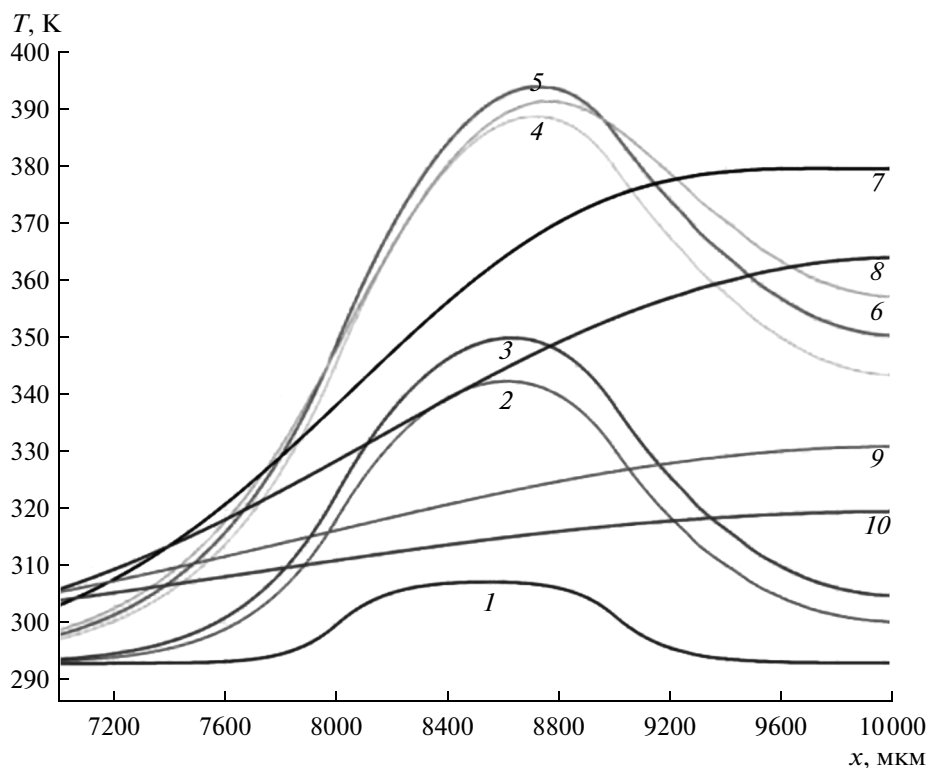


Рис. 3. Семейство зависимостей температуры иглы нагревателя от координаты для $h=1000$ мкм, $L_2 = 2000$ мкм, $P = 285$ мВт при $t = 0, \dots, 35$ мс. Момент выключения нагрева определяется по достижению температуры на нагревателе $T = 395$ К, $t = 0.0006$ (1), 0.0025 (2), 0.003 (3), 0.006 (4), 0.0065 (5), 0.007 (6), 0.01 (7), 0.015 (8), 0.0265 (9), 0.035 с (10).

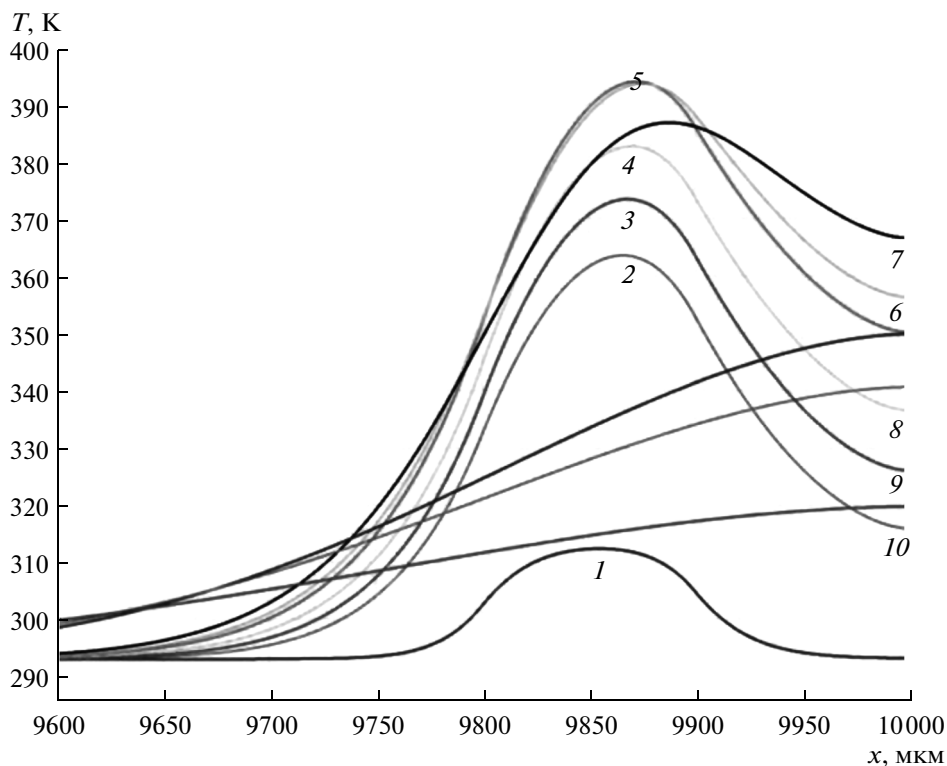


Рис. 4. Семейство зависимостей температуры иглы нагревателя от координаты для $h = 100$ мкм, $L_2 = 200$ мкм, $P = 30$ мВт при $t = 0, \dots, 440$ мкс. Момент выключения нагрева определяется по достижению температуры на нагревательном элементе $T = 395$ К, $t = 10$ (1), 50 (2), 60 (3), 70 (4), 83 (5), 89 (6), 100 (7), 240 (8), 280 (9), 440 мкс (10).

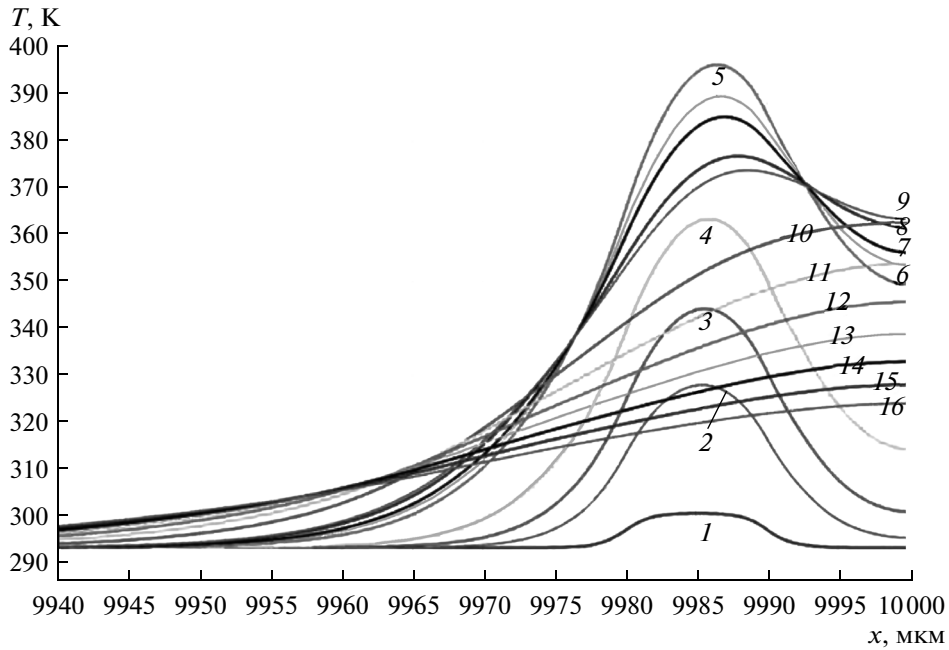


Рис. 5. Семейство зависимостей температуры от координаты для $h = 10$ мкм, $L_2 = 20$ мкм, $P = 9$ мВт при $t = 0, \dots, 9$ мкс. Момент выключения нагрева определяется по достижению температуры на нагревательном элементе $T = 395$ К, $t = 0.005$ (1), 0.03 (2), 0.05 (3), 0.08 (4), 0.14 (5), 0.16 (6), 0.17 (7), 0.19 (8), 2 (9), 3 (10), 4 (11), 5 (12), 6 (13), 7 (14), 8 (15), 9 мкс (16).

На рис. 5 представлено семейство зависимостей температуры от координаты для $h = 10$ мкм, $L_2 = 20$ мкм, $P = 9$ мВт при $t = 0 \dots 9$ мкс. В результате расчета найдено, что $t_{\text{имп}} = 1.4$ мкс, $t_{\text{п}} = 9$ мкс.

График, отражающий масштабирование результатов расчета энергии W , $t_{\text{имп}}$ от h , показан на рис. 6. Полученные в результате расчета допустимые значения мощности нагревателя P в зависи-

мости от масштабного параметра h показаны на рис. 7. В двойном логарифмическом масштабе расчетные зависимости для $W(h)$, $t_{\text{имп}}(h)$, $P(h)$ близки к линейным, что отвечает степенным зависимостям (рис. 8). Угловым коэффициентом прямой, рассчитанный по методу наименьших квадратов, составляет $k = 2.59$. Соответственно, получаем зависимости

$$W \sim h^{-2.59}, \tag{7}$$

$$t_{\text{имп}}(h) \sim h^{-2.59}, \tag{8}$$

$$P(h) \sim h^{-1}. \tag{9}$$

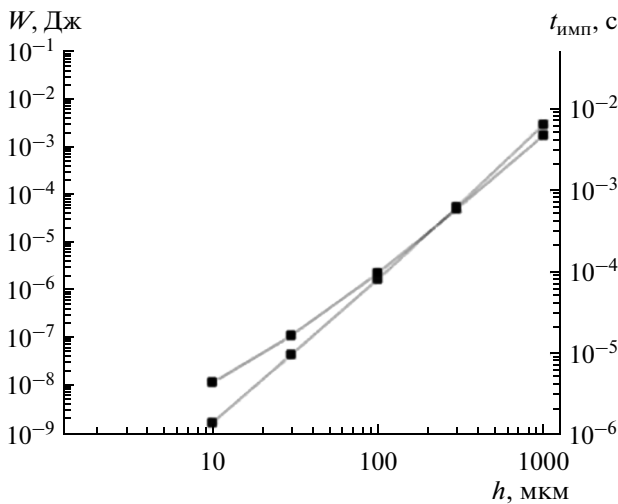


Рис. 6. Зависимость энергии W , необходимой для срабатывания наноинцета и времени срабатывания $t_{\text{имп}}$ от параметра h .

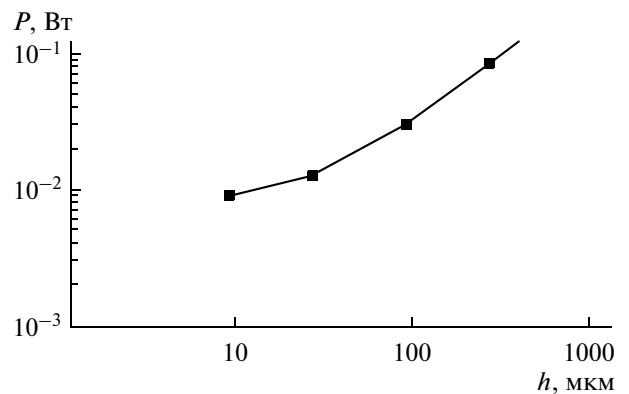


Рис. 7. Зависимость мощности P нагревательного элемента, ограниченной технологическими требованиями, от масштабного параметра h .

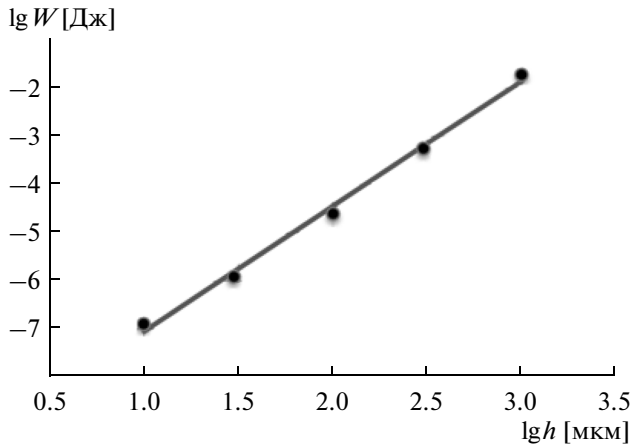


Рис. 8. Зависимость логарифма энергии W , необходимой для нагрева конца иглы до температуры 350 К, от логарифма ширины нагревателя h (точки); аппроксимация значений методом наименьших квадратов — прямая линия.

Зависимости (7)–(9) задают масштабирование (скейлинг) системы нагрева, что позволяет прогнозировать свойства системы управления в импульсном режиме при пропорциональном изменении размеров. Масштабный коэффициент h , так же как и технологический критерий, ограничивающий предельную температуру нагревателя, определяется на практике технологическими возможностями. Зависимости (7)–(9) указывают на резкое снижение времени срабатывания и энергопотребления в импульсном режиме при уменьшении масштабного параметра h .

Отметим, что вывод о повышении быстродействия при масштабировании в настоящей модели имеет характер необходимого, но не достаточного условия, так как отсутствуют экспериментальные факты, которые бы подтверждали возможность проявлений ЭПФ и мартенситного перехода на временном масштабе 10^3 с и менее. Для доказательства возможности создания быстродействующих высокопроизводительных микромеханических устройств, которые кроме ускорения процессов теплообмена учитывают динамику границы фаз аустенит–мартенсит и связанных с ее движением изменений формы миниатюрных образцов сплавов, должны быть проведены глубокие экспериментальные исследования, которые могут потребовать создания как новых сплавов с ЭПФ и технологий изготовления микрообразцов, так и новых экспериментальных методов их исследований.

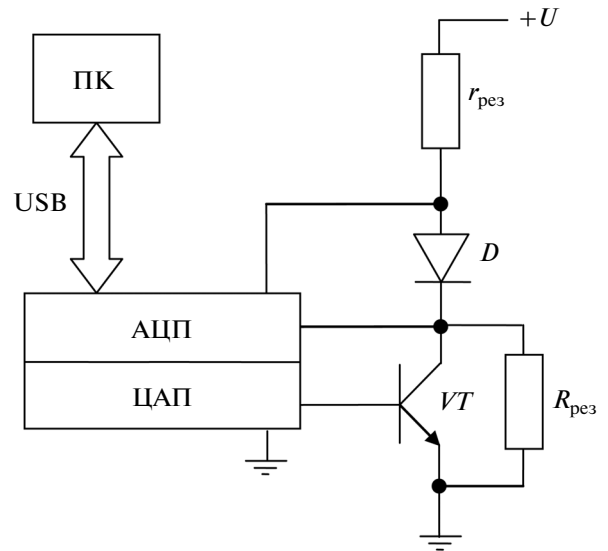


Рис. 9. Принципиальная схема устройства для управления процессом импульсного нагрева.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

А. Схема автоматического импульсного контроля процесса нагрева

Макет системы автоматического импульсного резистивного нагрева нанопинцета был изготовлен и испытан нами в камере ионного микроскопа FEI FIB Strata 201. Принципиальная электронная схема установки, предназначенной для контроля нагревания иглы, на которой установлен нанопинцет, изображена на рис. 9.

Установка работает следующим образом. Диод D закреплен вблизи конца иглы. Когда транзистор VT заперт, ток в цепи протекает через резистор $r_{рез}$, а также через диод D и резистор большего сопротивления $R_{рез} > r_{рез}$. В этом случае ток в цепи небольшой и не вызывает существенного повышения температуры диода. Напряжение на диоде измеряется при помощи платы аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Напряжение на диоде D при фиксированном токе зависит от температуры диода (в качестве диода D применен бескорпусный диод 2Д910Б1). Таким образом, предварительно изучив эту зависимость, можно вычислить температуру диода. В тот момент, когда транзистор открывается по сигналу цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), через диод протекает ток, ограниченный сопротивлением $r_{рез}$. Резистор $r_{рез}$ предохраняет диод от перегорания. Ток в этом случае уже существенный и вызывает нагревание диода и иглы.

Таким образом, цикл работы установки делится на два равных по длительности интервала вре-

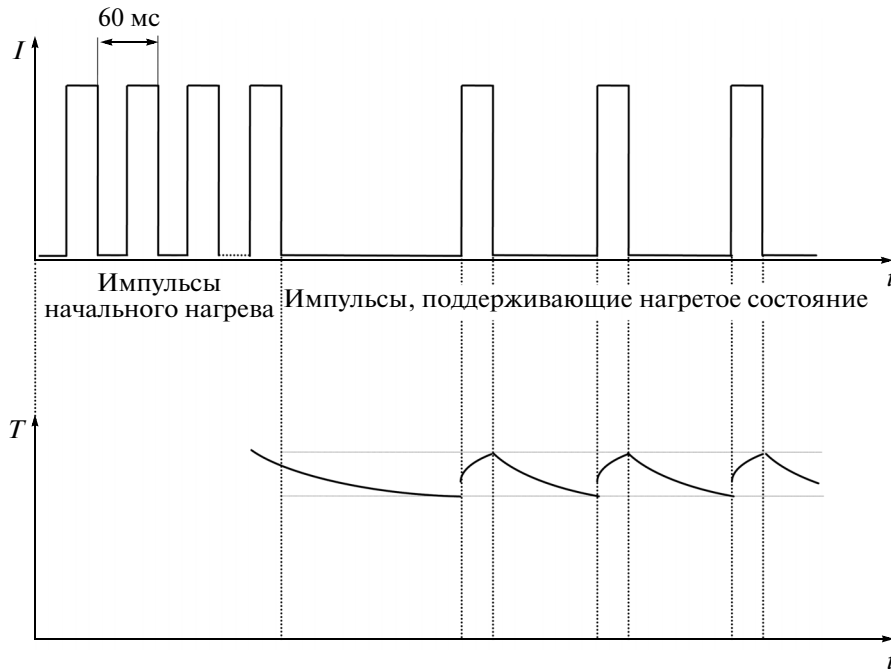


Рис. 10. Зависимости тока I и температуры T диода от времени импульсного нагрева в процессе управления микроустройством с ЭПФ.

мени: измерения и возможного нагрева. Если на интервале измерения температура диода окажется меньше необходимой для уверенного срабатывания нанопинцета, то на следующем интервале на транзистор будет подан сигнал от ЦАП, в цепи

увеличится ток и произойдет нагрев диода. Если же температура достаточна для поддержания пинцета в сомкнутом состоянии, то импульс подаваться не будет. Временные диаграммы, поясняющие принцип импульсного управления температурой нагревателя нанопинцета представлены на рис. 10.

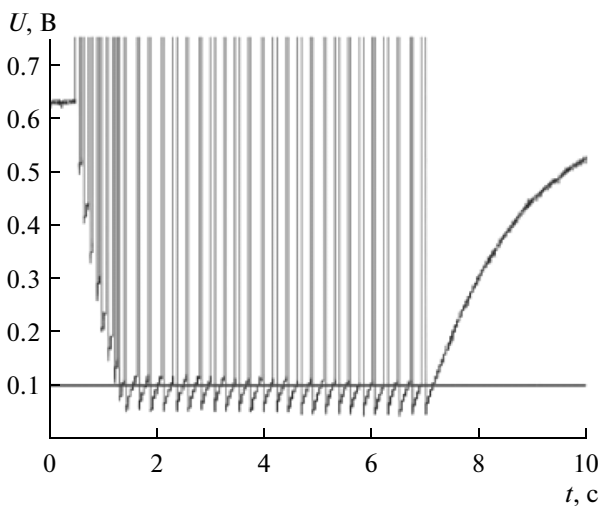


Рис. 11. Зависимость напряжения на диоде нагревательного элемента от времени при испытании системы управления микроустройством в импульсно-периодическом режиме. Показано, что в интервале измерений напряжение на диоде снижается вследствие повышения температуры. После достижения рабочей температуры среднее напряжение на диоде стабилизируется вблизи 0.1 В (горизонтальная линия).

Проведен эксперимент по испытанию системы управления композитным нанопинцетом в импульсно-периодическом режиме. На рис. 9 показана зависимость напряжения на диоде нагревательного элемента от времени. В процессе эксперимента цикл управления разбивался на два равных интервала длительностью 60 мс: интервал измерения и интервал возможного нагрева. Последовательности нагревающих импульсов вызывают нагрев диода и, следовательно, снижение напряжения на нем в интервале времени измерения (рис. 11). По достижении рабочей температуры значения T_1 , что приблизительно равно 0.1 В падения напряжения на диоде, среднее напряжение на диоде стабилизируется вблизи 0.1 В (горизонтальная линия) за счет автоматического снижения частоты подачи нагревающих импульсов тока. Система показала надежность процесса управления, а время срабатывания нанопинцета – менее 1 с.

Б. Результаты экспериментов по манипулированию нанообъектами

Устройство, включающее иглу, нагреватель (бескорпусный и кремниевый диод 2Д910Б1) и

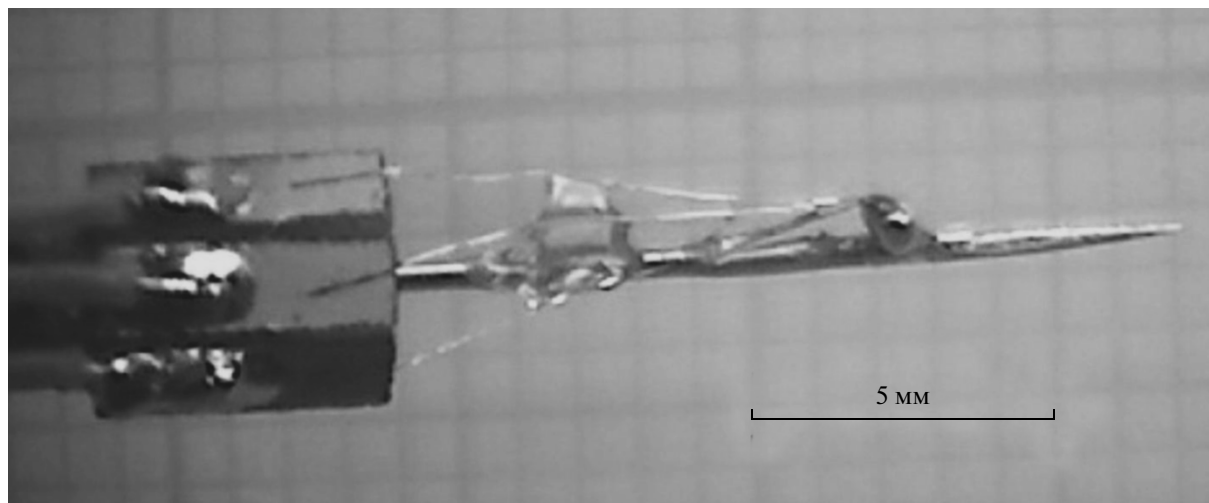


Рис. 12. Микрофотография нагревателя с укрепленным вблизи тонкого конца иглы нагревательным элементом – диодом.

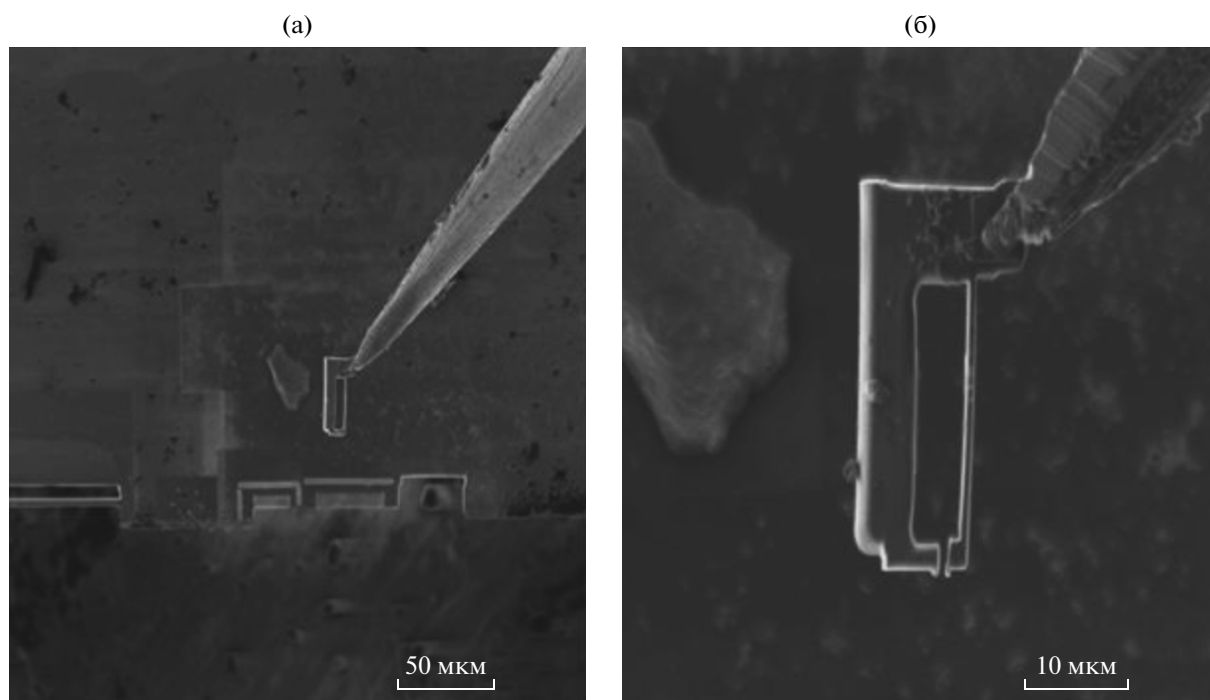


Рис. 13. Микрофотографии нанопинцета, расположенного на игле нагревателя: увеличение в 1000 (а) и в 5000 раз (б).

нанопинцет, было смонтировано и подсоединено к электронной схеме управления (рис. 12). Насадка-нагреватель совместима с коммерческими манипуляторами Kleindiek™. На рис. 13 приведена микрофотография нанопинцета, расположенного на игле нагревателя.

При помощи подобных манипуляторов были проведены эксперименты по манипулированию реальными субмикронными объектами: вискерами

квазиодномерных проводников TaS_3 и NbS_3 [19], в которых образуется волна зарядовой плотности (ВЗП). Вискеры имеют форму микро- и нанонитей с толщиной, как правило, менее 10 мкм. При этом минимальные поперечные размеры вискерров, как правило, ограничены возможностью их обнаружения, переноса на подложку и монтажа контактов к ним. Эти операции проводятся, в основном, вручную, с использованием оптических микроскопов, позволяющих при профессиональ-

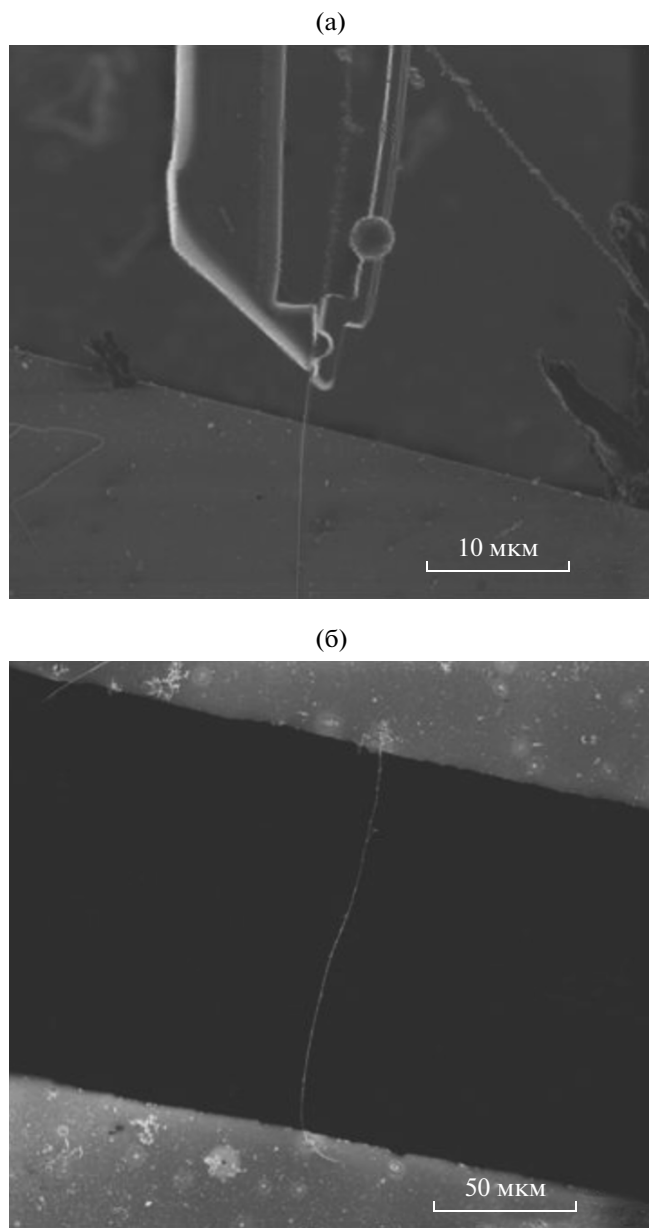


Рис. 14. Пример манипулирования реальным субмикронным объектом – вискером квазиодномерного соединения TaS₃: а) захват вискера нанопинцетом; б) результат манипулирования – нановискер TaS₃, перенесенный на контактную площадку.

ном мастерстве и известном навыке специалиста исследовать образцы до ~10 нм шириной при расстоянии между контактами до 1 мкм. Приготовление таких структур требует больших усилий. При этом нужно отметить, что эти усилия оправдали себя обнаружением ряда эффектов (размерных), наблюдающихся только в подобных образцах (см. [20] и ссылки там): “квантование состояний”, мезоскопические осцилляции порогового поля, когерентность скольжения ВЗП, сверхвысокочастотная синхронизация скольжения СВЧ-полем [19],

рекордные плотности тока ВЗП и другие эффекты. Подвешенные образцы квазиодномерных проводников могут функционировать как уникальные самочувствительные крутильные резонаторы [21, 22], причем уменьшение длины подвешенной части до 1 мкм приведет, как ожидается, к повышению частоты основного резонанса до 1 ГГц и выше.

Упомянутые выше обстоятельства делают весьма актуальной задачу манипулирования нановискерами образцов с ВЗП и приготовления к ним контактов при возможности контроля операций, например, с помощью электронного сканирующего микроскопа. В ходе эксперимента выделялся из общего ростового массива отдельный нитевидный кристалл NbS₃ (рис. 14а), который переносили на другую подложку. Концы отобранного вискера закрепляли при помощи ионного осаждения платины на двух контактных площадках, чтобы измерить удельное сопротивление (рис. 14б). Последующие измерения показали хорошее качество контактов.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты приближенных расчётов по предложенной модели сформулированы в виде масштабных соотношений (5)–(7). Они отражают очень быстрое, по степенному закону, возрастание быстродействия и снижение необходимой энергии $W \sim h^{-2.59}$. Из равенств следует, что на практике можно надеяться на снижение необходимой энергии импульса управления до $10^{-7} \dots 10^{-8}$ Дж, а времени срабатывания до 10...1 мкс. Однако отметим, что на пути применения соотношений (5)–(7) возникают большие сложности как технологического, так и фундаментального физического порядка. Например:

1) в настоящее время не известны фундаментальные физические ограничения на скорость проявления мартенситного фазового превращения и обусловленного им ЭПФ;

2) масштабное соотношение $W \sim h^{-2.59}$ справедливо только для импульсного режима нагрева. Если непрерывная последовательность импульсов следует длительно, то нанопинцет не будет остывать и размыкаться. Ситуация аналогична потреблению энергии в аналоговой и цифровой электронике. Для того чтобы энергия потреблялась системой управления нанопинцета только в процессе изменения состояния, его конструкция должна отвечать нормально-замкнутому состоянию. При этом объект неограниченно долго, без затрат энергии, остается захваченным нанопинцетом. Высвобождение осуществляется при подаче следующего импульса;

3) отметим также основную системную трудность на пути осуществления высоких скоростей наноманипулирования: невысокая частота полу-

чения изображения на современных наблюдательных приборах: сканирующих электронных и ионных микроскопов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулируем основные результаты работы.

1. Предложена модель процесса управления микромеханическим термоактивируемым устройством с ЭПФ, расположенным на конце конической иглы. Модель учитывает процессы теплообмена между иглой и нагревателем и теплоотвод в основании иглы. Модель позволяет рассчитать время нагрева от начальной температуры до температуры срабатывания устройства (температура превращения мартенсит-аустенит сплава с ЭПФ) и его возвращения в исходное состояние (остывание до температуры перехода аустенит-мартенсит). Принятые технологические ограничения на максимальную допустимую температуру нагревателя. Геометрические размеры масштабируются в допустимых для современной технологии пределах – от 10 мм до 10 мкм.

2. Численные расчеты показали, что при уменьшении размера нагревательного элемента, расположенного на расстоянии 10 мм...10 мкм от конца стандартной вольфрамовой иглы толщиной 0.5 мм, время срабатывания понижается от 6.5 мс до 1.45 мкс, а энергопотребление – от 1.85×10^{-3} до 1.3×10^{-8} Дж.

3. Экспериментально реализована система управления наноинжетом с ЭПФ на конце вольфрамовой иглы, совместимой с наноманипулятором Kliendiek. Импульсно-периодический режим контроля температуры позволяет включать нагреватель, удерживать температуру и сам наноинжет в замкнутом состоянии и выключать по команде оператора. Продемонстрировано манипулирование реальными микрообъектами.

4. На основе результатов работы сформулирован принцип масштабирования (скейлинга) устройств микро- и наномеханики с термомеханическим управлением, который предсказывает, что последовательное уменьшение масштаба размеров от 1 мм до 10 мкм может привести к степенному закону увеличения быстродействия и снижения энергии, необходимой для срабатывания микромеханического устройства. Согласно найденному принципу масштабирования можно резко увеличить производительность перспективных наноробототехнических систем и снизить их энергопотребление при переходе на технологию,

позволяющую уменьшить геометрический размер системы нагрева.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 14-19-01644).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gunderov D.A., Lukyanov A., Prokofiev E.A. et al.* // Mater. Sci. Engineering. A. 2009. V. 503. № 1–2. P. 75.
2. *Божко А.Д., Васильев А.Н., Ховайло В.В. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 1998. Т. 67. № 3. С. 214.
3. *Божко А.Д., Васильев А.Н., Ховайло В.В. и др.* // ЖЭТФ. 1999. Т. 115. № 5. С. 1740.
4. *Cherechukin A.A., Dikshstein I.E., Ermakov D.I. et al.* // Phys. Lett. A. 2001. V. 291. № 2–3. P. 175.
5. *Buchelnikov V.D., Dikshstein I.E., Greshichkin R.M. et al.* // J. Magn. Magn. Mater. 2004. V. 272–276. Pt. 3. P. 2025.
6. *Коуров Н.И., Королев А.В., Пушин В.Г. и др.* // ФММ. 2005. Т. 99. № 4. С. 38.
7. *Пушин В.Г., Коуров Н.И., Королев А.В. и др.* // ФММ. 2005. Т. 99. № 4. С. 64.
8. *Kalimullina E., Kamantsev A., Koledov V. et al.* // Phys. Stat. Sol. C. 2014. V. 11. № 5–6. P. 1023.
9. *Irzhak A., Koledov V., Zakharov D. et al.* // J. Alloys Compd. 2014. V. 586. Suppl. 1. P. S464.
10. *Akatyeva K., Afonina V., Albertini F. et al.* // Sol. Stat. Phenomena. 2012. V. 190. P. 295.
11. *Zakharov D., Lebedev G., Irzhak A. et al.* // Smart Mater. Structures. 2012. V. 21. № 5. P. 052001.
12. *Shelyakov A.V., Sitnikov N.N., Koledov V.V. et al.* // Int. J. Smart Nano Mater. 2011. V. 2. № 2. P. 68.
13. *Shelyakov A.V., Sitnikov N.N., Menushenkov A.P. et al.* // Thin Solid Films. 2011. V. 519. № 15. P. 5314.
14. *Zakharov D., Lebedev G., Koledov V. et al.* // Phys. Procedia. 2010. V. 10. P. 58.
15. *Иржак А.В., Захаров Д.И., Калашников В.С.* // РЭ. 2010. Т. 55. № 7. С. 874.
16. *Иржак А.В., Калашников В.С., Коледов В.В. и др.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. № 7. С. 75.
17. *Тихонов А.Н., Самарский А.А.* Уравнения математической физики. М.: Изд-во МГУ, 2004.
18. *Мартинсон Л.К., Малов Ю.И.* Дифференциальные уравнения математической физики. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
19. *Покровский В.Я., Зыбцев С.Г., Никитин М.В. и др.* // Успехи физ. наук. 2013. Т. 183. № 1. С. 33.
20. *Зайцев-Зотов С.В.* // Успехи физ. наук. 2004. Т. 174. № 6. С. 585.
21. *Никитин М.В., Покровский В.Я., Зыбцев С.Г.* // Журн. радиоэлектроники. 2013. № 2 (<http://jre.cplire.ru/jre/feb13/8/text.pdf>).
22. *Pokrovskii V.Ya., Nikitin M.V., Zybsev S.G.* // Physica B. 2015. V. 460. P. 39.