

## Диагностика тепловых кинетических коэффициентов для оптимизации характеристик пленочных болометров

© Ю.В. Медведев,<sup>1</sup> Ю.М. Николаенко,<sup>1</sup> А.М. Гришин,<sup>2</sup> С.И. Харцев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины, 83114 Донецк, Украина

<sup>2</sup> Royal Institute of Technology, S-100 44, Stockholm, Sweden

(Поступило в Редакцию 13 сентября 2000 г. В окончательной редакции 16 мая 2001 г.)

На основе импульсной микроволновой техники развита методика быстрой и корректной диагностики полного набора тепловых кинетических коэффициентов в однослойных пленочных структурах. Метод применен к  $\text{La}_{0.7}(\text{Pb}_{0.7}\text{Sr}_{0.3})_{0.3}\text{MnO}_3$  пленкам на подложках  $\text{LaAlO}_3$  и  $\text{SrTiO}_3$  с рекордным значением температурного коэффициента сопротивления 5–7% для манганитсодержащих материалов при "комнатной" температуре. На основе численного моделирования проанализирована возможность улучшения характеристик неохлаждаемых болометров за счет изменения теплопроводности подложки, а также создания оптимальных пленочных структур за счет согласованного выбора величин тепловых сопротивлений на интерфейсах пленка–подложка и подложка–термостат.

### Введение

Достигнутые за последнее время успехи в пленочной технологии ВТСП и манганитсодержащих материалов связаны в основном с оптимизацией электрофизических характеристик пленок. Совершенствование других свойств структуры, например параметров, ответственных за процесс теплообмена в системе, при этом опускалось из вида. Поэтому не удивительно, что с точки зрения болометрических приложений лучшие по электрофизическим свойствам пленочные структуры не характеризуются оптимальными термодинамическими параметрами [1,2]. Этот факт, в частности, проявляется в ярко выраженной нелинейности АЧХ и большой величине максимальной постоянной времени болометрического отклика. При этом одновременно обеспечить приемлемые характеристики болометра по быстродействию и вольт-ваттной чувствительности за счет оптимизации размеров и формы пленки или всей структуры уже практически невозможно. В случае охлаждаемых приборов эта проблема частично решалась путем создания гибридных конструкций [3,4]. Тем не менее даже в случае неохлаждаемых болометров она может быть решена прямо за счет оптимизации теплового сопротивления  $R_{fs}$  на интерфейсе пленка–подложка  $R_{fs} = (S\lambda_{fs})^{-1}$ ,  $S$  — площадь пленки,  $\lambda_{fs}$  — коэффициент теплопроводности интерфейса пленка–подложка. При всей простоте данной идеи, которая на качественном уровне известна давно [3], ее реализация требует разработки новой технологии напыления пленок с учетом формирования величины  $R_{fs}$ . Вариация  $R_{fs}$  в свою очередь требует развития и распространения надежных и доступных методов диагностики этого параметра.

Один из существующих в настоящее время стационарный метод оценки  $R_{fs}$  [5] базируется на измерении разницы температур между двумя металлическими полосками, нанесенными на пленку и являющимися одновременно

нагревателями и температурными датчиками. В пределе малого тока каждый датчик измеряет температуру пленки, равную температуре подложки. При увеличении тока через одну из полосок между датчиками возникает разность температур, по которой судят о тепловом сопротивлении  $R_{fs}$ . Недостатками метода являются наличие дополнительного интерфейса между датчиком и пленкой, а также отсутствие объективного контроля градиента температуры в подложке.

Другой, нестационарный метод оценки  $R_{fs}$  основан на анализе величины временной константы оптического болометрического отклика [5,6]. Этот метод дает более богатую и надежную информацию о тепловых коэффициентах структуры, но при упрощенном подходе к интерпретации процессов перераспределения тепла в системе его возможности оказываются ограниченными в оценке относительно малых значений  $\lambda_{fs}$  ( $\lambda_{fs} \leq 10^5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ). Трудность же оценки больших значений  $\lambda_{fs}$  ( $\lambda_{fs} \sim 10^7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ) заключена в появлении неболометрической части отклика, которая в ВТСП пленках может превышать соответствующую часть болометрического.

Перечисленных недостатков лишен нестационарный метод диагностики  $R_{fs}$ , оперирующий как с временными, так и амплитудными характеристиками болометрического отклика [7]. Метод основан на импульсном нагреве пленки микроволновой мощностью, регистрации и анализе временной функции разности температур  $\Delta T_f(t)$  между температурами пленки  $T_f$  и термостата  $T_0$ . Значения тепловых кинетических коэффициентов (ТКК) структуры извлекаются в результате численного моделирования всей функции  $\Delta T_f(t)$  с учетом информативности различных ее участков. Порядки величин ТКК могут быть оценены также с помощью приближенных аналитических соотношений для температурных перепадов ( $\Delta T_i$ ) и временных констант ( $\tau_i$ ) (здесь индексы  $i$  принимают значения от 1 до 3), характеризующих уста-

новление стационарного теплопереноса на интерфейсе пленка–подложка (1), на толщине подложки (2) и на интерфейсе подложка–термостат (3). При этом каждое значение времени  $\tau_i$  соответствует различным участкам функции  $\Delta T_f(t)$  и определяется при облучении пленки микроволновыми импульсами подходящей длительности.

В данной работе метод [7] получил дальнейшее развитие и применен к исследованиям пленочных структур  $\text{La}_{0.7}(\text{Pb}_{0.7}\text{Sr}_{0.3})_{0.3}\text{MnO}_3/\text{LaAlO}_3$  и  $\text{La}_{0.7}(\text{Pb}_{0.7}\text{Sr}_{0.3})_{0.3}\text{MnO}_3/\text{SrTiO}_3$  с различной толщиной "dead" слоя и при "комнатных" температурах. Это позволило определить весь набор ТКК, включая  $R_{fs}$ . Процедура измерений позволяет оценить нужные параметры даже в случае, когда времена релаксации теплового потока на интерфейсе пленка–подложка и на толщине подложки становятся сравнимыми по величине. Большое значение имеет то, что точные и упрощенные выражения при описании перераспределения поглощенной энергии в системе дают близкие результаты для искомых величин.

На основе численного моделирования рассмотрены также пределы изменения основных характеристик болометра в зависимости от ТКК структуры. Показана возможность значительного (на три порядка) повышения быстродействия приборов без снижения их вольт-ваттной чувствительности за счет оптимизации ТКК. Это позволяет глубже понять связь между болометрическим откликом и физическими свойствами пленочных систем, их локальной структурой поверхностей раздела.

## Характеристика метода временной термометрии и результаты измерений

Для развития метода временной термометрии при переносе тепла фонами через поверхность раздела различных сред нами использованы магниторезистивные  $\text{La}_{0.7}(\text{Pb}_{0.7}\text{Sr}_{0.3})_{0.3}\text{MnO}_3/\text{LaAlO}_3$  и  $\text{La}_{0.7}(\text{Pb}_{0.7}\text{Sr}_{0.3})_{0.3}\text{MnO}_3/\text{SrTiO}_3$  пленочные структуры (в дальнейшем структуры 1 и 2). Пленки получены методом импульсного лазерного распыления мишени (PLD-метод) [1]. Их толщина оценивается величиной  $0.5 \mu\text{m}$ . Размер подложек для структур 1 и 2 составляет  $3 \times 6.7 \times 0.6$  и  $2 \times 5 \times 0.5 \text{mm}$ . Состав пленок выбран с таким расчетом, чтобы получить максимальную величину температурного коэффициента сопротивления  $\text{TKC} = \partial(\ln(R))/\partial T = 5\text{--}7\%$  при "комнатной" температуре. Температурная зависимость электрического сопротивления пленок, отнесенного к своему максимальному значению (1875 и 9990  $\Omega$  соответственно для структур 1 и 2), приведена на рис. 1.

Измерительное устройство представляет собой медный волноводный фланец, размещенный в вакуумной камере и выполняющий одновременно функцию термостата. Пленочная структура приклеивалась со стороны подложки к слюдяной пластине, закрывающей волноводное окно размером  $3.6 \times 7.2 \text{mm}$ . Температура волноводного фланца контролировалась медным термометром

и регулировалась посредством нагревателя электронным устройством с разрешением  $10^{-2} \text{K}$ . Тепловой сток от термостата к корпусу вакуумной камеры обеспечивался отрезком медной шины с тепловым сопротивлением порядка 10 К/Вт.

Для регистрации временных зависимостей температуры пленки использовался 10-разрядный (10-bit) аналого-цифровой преобразователь с максимальным быстродействием  $10^7$  выборок в секунду. Температура пленки определялась по величине и изменению электрического сопротивления. Методика регистрации временных зависимостей включала два режима манипуляции мощностью. Режим однократного включения ( $P_{mv}$ ) использовался в максимальном временном масштабе. В более коротких масштабах использовался режим последовательности прямоугольных импульсов  $P_{mv}$  со скважностью 2. В этом случае происходят периодический нагрев и охлаждение пленки. Такая методика позволяет исследовать любой участок кривой  $T_f(t)$ , регулируя длительность импульсов излучения, чувствительность приемника и температуру термостата.

На рис. 2 кружками приведены экспериментальные зависимости  $\Delta T_f(t)$ , полученные путем суммирования нескольких файлов данных по термометрии пленок в различных масштабах времени. Сплошные кривые на рис. 2 соответствуют результату численного расчета функции  $\Delta T_f(t)$  с параметрами, обеспечивающими наилучшее совпадение с экспериментальными зависимостями. На рис. 3, а–с результат совпадения кривых показан в линейном масштабе.

Математическая основа количественного анализа временной функции температуры пленки и вычисления термодинамических коэффициентов структур обеспечивалась следующей системой уравнений [7–10]:

$$c_f \rho_f V_f (\partial T_f / \partial t) = -(S \lambda_{fs})(T_f - T_s(x=0, t)) + P_j, \quad (1)$$

$$c_s \rho_s (\partial T_s / \partial t) = \lambda_s (\partial^2 T_s / \partial x^2). \quad (2)$$

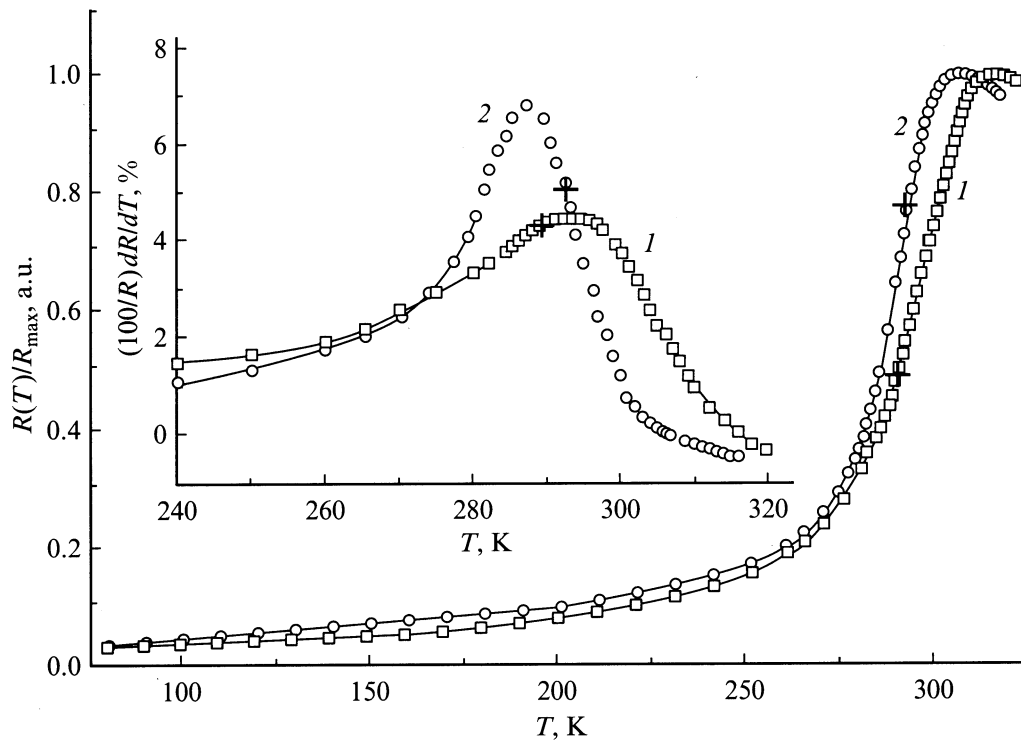
Здесь  $c_f$  и  $c_s$  — удельная теплоемкость материала пленки и подложки,  $\rho_f$  и  $\rho_s$  — плотность материала пленки и подложки,  $S$  — площадь пленки,  $\lambda_{fs}$  — теплопроводность интерфейса пленка–подложка,  $P_j$  — джоулева мощность,  $\lambda_s$  — коэффициент удельной теплопроводности подложки,  $V_f$  — объем пленки. Начальные и граничные условия задавались в виде

$$T_f = T_s = T_0, \quad t = 0, \quad (3)$$

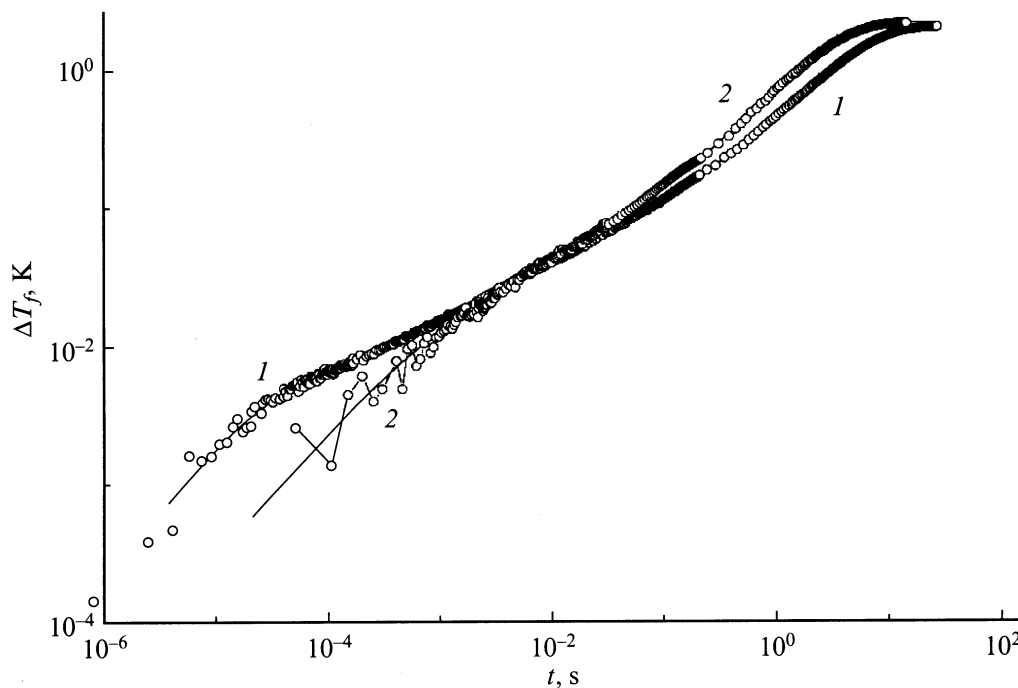
$$\lambda_s (\partial T_s / \partial x) = \lambda_{fs} (T_f - T_s), \quad x = 0, \quad (4)$$

$$\lambda_s (\partial T_s / \partial x) = \lambda_{st} (T_s - T_0), \quad x = D. \quad (5)$$

Точка  $x = 0$  выбрана нами на границе пленка–подложка (ось  $x$  направлена перпендикулярно плоскости пленки). Точка  $x = D$  соответствует границе подложка–термостат. Мы пренебрегаем градиентом температуры в пленке, а теплопроводности границ раздела  $\lambda_{fs} = (SR_{fs})^{-1}$  и  $\lambda_{st} = (SR_{st})^{-1}$  ( $R_{st}$  — тепловое



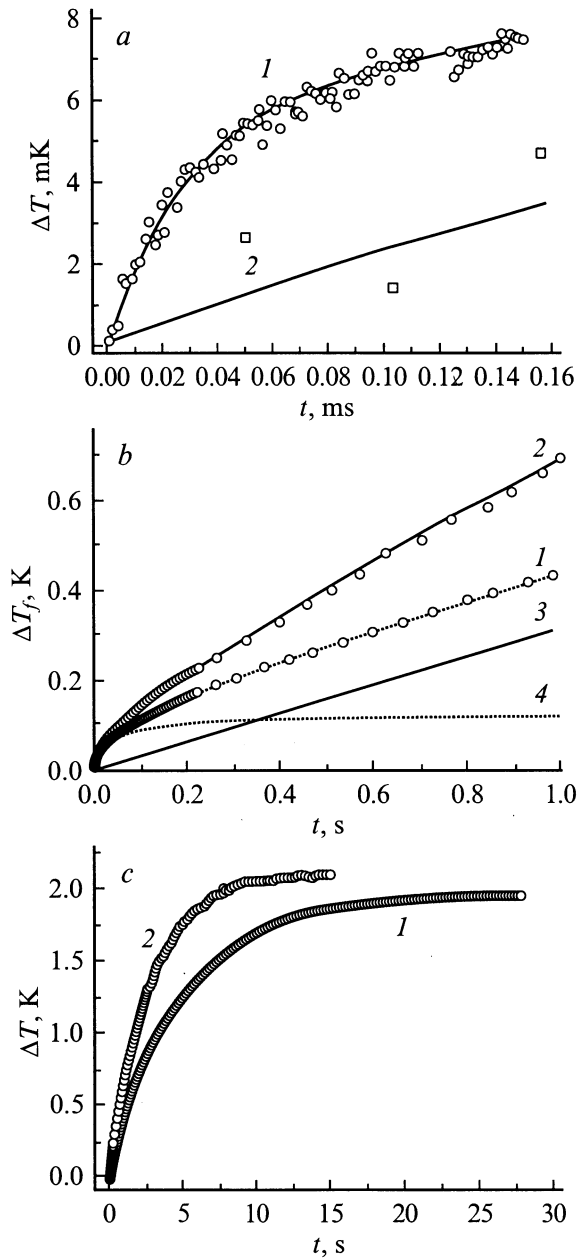
**Рис. 1.** Температурная зависимость электрического сопротивления пленок, нормированного на свое максимальное значение. На вставке — температурная зависимость относительно ТКС. 1, 2 —  $\text{La}_{0.7}(\text{Pb}_{0.7}\text{Sr}_{0.3})_{0.3}\text{MnO}_3$  пленки на подложках  $\text{LaAlO}_3$  и  $\text{SrTiO}_3$ .



**Рис. 2.** Временные зависимости температуры нагрева пленок  $\text{La}_{0.7}(\text{Pb}_{0.7}\text{Sr}_{0.3})_{0.3}\text{MnO}_3$  на подложках  $\text{LaAlO}_3$  (1) и  $\text{SrTiO}_3$  (2) в двойном логарифмическом масштабе. Кружки — эксперимент, кривые — численный расчет.

сопротивление интерфейса подложка–термостат) считаем независимыми от  $T$ , т.е. рассматриваем случай малых изменений температуры  $\Delta T_f(t) \ll T_0$ . Кроме этого,

мы не рассматриваем эффекты неустойчивости из-за саморазогрева пленки [3,9] вследствие резкой зависимости  $P_j(T)$ .



**Рис. 3.** То же, что на рис. 2, в линейном масштабе времени. 3 и 4 — линейная и насыщающаяся части функции кривой 1.

Как видно из формы кривых рис. 2 и 3, процесс установления стационарного неравновесного состояния происходит в несколько стадий, характеризующихся различной скоростью изменения функции  $\Delta T_f(t)$ . Для качественного понимания соответствия между особенностями кривой  $\Delta T_f(t)$  и процессами теплопереноса в структуре удобно воспользоваться результатами идеальных моделей, которые обычно привлекаются при анализе болометрического отклика (см. также [7]). В рамках модели подложка–идеальный термостат ( $c_s = \infty$ ) временной ход изменения температуры пленки после включения постоянной мощности нагрева ( $P_j$ ) описывается

экспоненциальной зависимостью

$$\Delta T_f(t) = \Delta T_1(1 - \exp(-t/\tau_1)), \quad (6)$$

где постоянная времени  $\tau_1 = c_f \rho_f V_f R_{fs}$  и температурная амплитуда на интерфейсе пленка–подложка  $\Delta T_1 = P_j R_{fs}$ .

Температура границы подложки, прилегающей к пленке, при распространении постоянного теплового потока внутри подложки описывается составной функцией, включающей линейную и насыщающуюся части, которые соответственно описывают увеличение средней температуры подложки и движение фронта потока от одного интерфейса к другому [10]

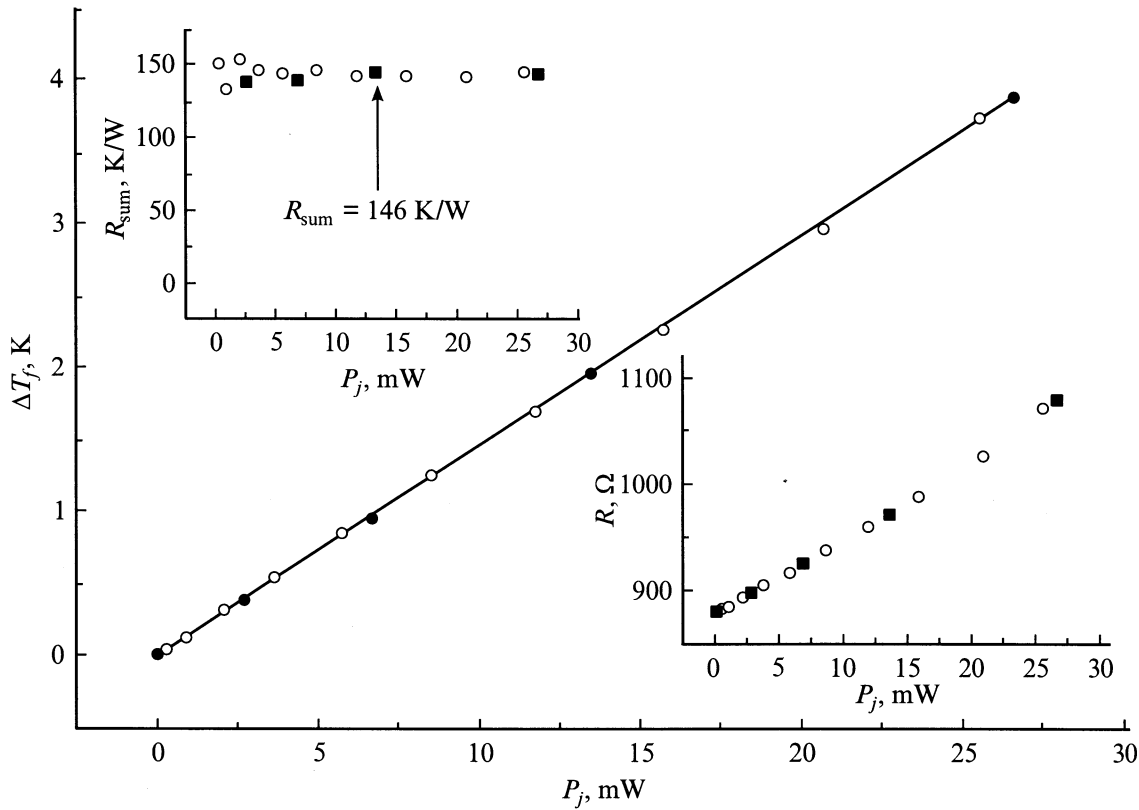
$$T_s(x=0, t) = T_0 + \frac{P_j}{c_s \rho_s V_s} + \Delta T_2 \left( 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-n^2 \pi^2 \frac{t}{\tau_2}\right) \right). \quad (7)$$

Здесь  $V_s$  — объем подложки,  $\tau_2 = c_s \rho_s V_s / (S \lambda_s)$  и температурный перепад между верхней и нижней границами подложки  $\Delta T_2 = P_j D / (3S \lambda_s)$ . Наконец, на интерфейсе подложка–термостат при рассмотрении нагрева структуры как целого вид зависимости опять является экспоненциальным

$$\Delta T_f(t) = \Delta T_3(1 - \exp(-t/\tau_3)). \quad (8)$$

Здесь временная константа  $\tau_3 = (c_f \rho_f V_f + c_s \rho_s V_s) R_{st}$  соответствует установлению в системе стационарного теплопереноса с разностью между температурами пленки и термостата  $\Delta T_3 = P_j R_{st}$ . Приближенные соотношения (6)–(8) наглядно показывают связь ТКК структуры с качественными особенностями кривой  $\Delta T_f(t)$  и при условии  $\tau_1 \gg \tau_2 \gg \tau_3$  могут быть использованы для оценки коэффициентов по порядку величины.

Ключевым параметром, определяющим возможность количественного анализа температурных амплитуд и получение численных значений ТКК, является величина джоулевой мощности. Специалистам в области микроволновой техники известен целый ряд причин, по которым величина  $P_j$  не может быть определена по величине подводимой  $P_{mw}$ . Поэтому нами была разработана специальная процедура нормировки  $P_j$ , не зависящая от конкретных условий облучения пленки. Для нормировки  $P_j$  и проверки корректности определения температуры пленки по величине резистивного отклика использовалась зависимость  $\Delta T_f(P_j)$  (здесь  $P_j = I^2 R$ ,  $R$  — электрическое сопротивление пленки,  $I$  — ток смещения). Данная зависимость должна быть и является линейной (рис. 4). Она получена путем пересчета зависимости  $R(I)$  с учетом функции  $R(T)$ , измеренной при достаточно малом токе смещения. Слабая нелинейность  $R(P_j)$  (нижняя вставка на рис. 4) является следствием нелинейности  $R(T)$  и может служить критерием при определении малости  $\Delta T$ .



**Рис. 4.** Зависимость температуры нагрева пленки 1 от величины джоулевой мощности. На нижней вставке — зависимость электрического сопротивления пленки 1 от величины джоулевой мощности, на верхней — величина суммарного теплового сопротивления пленка-термостат структуры 1, полученная при различных значениях джоулевой мощности.  $\circ$  — нагрев пленки постоянным током;  $\bullet, \blacksquare$  — нагрев микроволновой мощностью. Уровень микроволновой мощности ( $P/P_{max} = 1, 0.5, 0.25, 0.1$  и  $0$ ) регулировался аттенуатором.

Темными кружками и квадратами на рис. 4 показана зависимость  $\Delta T_f(P_j)$ , полученная в режиме малого тока смещения при нагреве пленки различным уровнем микроволновой мощности. Величина  $P_{mw}$  при этом регулировалась аттенуатором. Вследствие низкого сопротивления электрических контактов, представляющих собой напыленные по краям пленки Ag полоски, эффект прямого детектирования при включении микроволновой мощности полностью отсутствовал даже при двухзондовой схеме подключения контактов. Из линейности двух зависимостей  $\Delta T_f(P_j)$  следует, что величина джоулевой мощности пропорциональна величине микроволновой, а нормировка  $P_j$  может осуществляться путем умножения  $P_{mw}$  на коэффициент, обеспечивающий наилучшее совпадение двух линейных функций (рис. 4). На верхней вставке к рис. 4 приведены значения суммарного теплового сопротивления пленочной структуры  $R_{sum} = \Delta T/P_j$ , вычисленные по данным зависимости  $\Delta T$  от  $P_j$ .

Величина нормированной мощности и значения ТКК, полученные в результате процедуры фитинга кривых (рис. 2) для структур 1 и 2, приведены во второй и четвертой строках таблицы. В первой и третьей строках

таблицы приведены типичные литературные данные по ТКК [11–14], которые использовались нами в качестве стартовых в процедуре фитинга. Кроме того, в первой и третьей строках приведены величины временных констант  $\tau_i$  и температурных амплитуд  $\Delta T_i$ , рассчитанных с помощью приведенных выше соотношений (6)–(8).

Как видно из сопоставления литературных данных по ТКК (первая и третья строки таблицы) с коэффициентами, определенными в результате процедуры фитинга (вторая и четвертая строки), некоторые коэффициенты сильно различаются. В частности,  $\lambda_{fs}$  для структуры 1 оказался на два порядка ниже. Этот факт объясняется наличием на поверхности подложки тонкого "dead" слоя [1,15] с низкой электропроводностью и, как выяснилось, с низкой теплопроводностью. Низкая теплопроводность ( $\lambda_s$ )  $LaAlO_3$  подложки может быть объяснена присутствием блоков в монокристалле.

Более загадочное расхождение наблюдается у коэффициента теплоемкости  $SrTiO_3$  подложки, который оказался заниженным почти в 2 раза. Кроме того, подложка обладает заниженной плотностью (4760 вместо 6450  $kg/m^3$ ), что свидетельствует о весьма низком качестве материала. Поэтому данные по структуре 2 при

Тепловые кинетические коэффициенты, температурные амплитуды и постоянные времени пленочных структур  $\text{La}_{0.7}(\text{Pb}_{0.7}\text{Sr}_{0.3})_{0.3}\text{MnO}_3$  на подложках  $\text{LaAlO}_3$  и  $\text{SrTiO}_3$

№	Материал подложки	$C_f$ , J/K	$\lambda_{fs}$ , W/m <sup>2</sup> · K	$c_s$ , J/kg · K	$\lambda_s$ , W/m · K	$\lambda_{st}$ , W/m <sup>2</sup> · K	$\tau_1$ , $\mu\text{s}$	$\tau_2$ , s	$\tau_3$ , s	$\Delta T_1$ , mK	$\Delta T_2$ , K	$\Delta T_3$ , K	$P_j$ , mW
1	$\text{LaAlO}_3$	$4 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^7$	441	10.7	335	0.2	0.11	5.9	0.065	0.011	1.9	13
2	$\text{LaAlO}_3$	$6.43 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^5$	483	1.4	380	–	–	–	–	–	–	13
3	$\text{SrTiO}_3$	$1.1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^7$	830	2.46	500	0.11	0.415	3.95	0.098	0.066	1.95	9.75
4	$\text{SrTiO}_3$	–	$1 \cdot 10^7$	437	2.3	503	–	–	–	–	–	–	9.75

Примечание. В первой и третьей строках приведены значения кинетических коэффициентов, рассчитанных на основе литературных данных [11–15] и использованных в качестве стартовых в процедуре фитинга. Величины температурных амплитуд и постоянных времени вычислены по формулам модельных приближений (6)–(8). Во второй и четвертой строках приведены значения параметров, определенных с помощью процедуры фитинга.

водятся нами для демонстрации актуальности применения метода к непаспортизованным подложкам. Тем не менее величина коэффициента теплопроводности ( $\lambda_s$ ) для  $\text{SrTiO}_3$  подложки согласуется с данными справочника [14], но при этом в 4.3 раза оказывается ниже, чем в работе [11].

Еще одна особенность структуры 2 связана с существенно более высоким уровнем избыточного шума пленки по сравнению со структурой 1. Это, в частности, не позволило провести термометрию пленки в масштабе времени порядка  $\tau_1$ . Поэтому для процедуры фитинга кривой 2 на рис. 2 использовано значение  $C_f$  пленки 1 с учетом размера пленки 2. В то же время имеющийся диапазон данных для структуры 2 фиксирует величину  $\lambda_{fs}$  на уровне не ниже, чем  $10^7$  W/m<sup>2</sup> · K.

Различие величин  $\lambda_{fs}$  для структур 1 и 2, по нашему мнению, отражает факт различных по величине и знаку рассогласований между параметрами решетки материалов пленки и подложки. Исходя из данных работы [1] толщина "dead" слоя в структуре 2 должна быть на порядок меньше, чем в структуре 1.

## Улучшение временных характеристик болометрического отклика пленочных структур

Учитывая хорошее соответствие экспериментальных и теоретических зависимостей  $T_f(t)$  для пленочных структур, работающих в режиме параллельного потока тепла в системе пленка–подложка–термостат, нетрудно проанализировать основные возможности улучшения временных характеристик неохлаждаемых болометров. Заметим, что универсальная процедура оптимизации термодинамических характеристик пленочных структур до настоящего времени отсутствует [4].

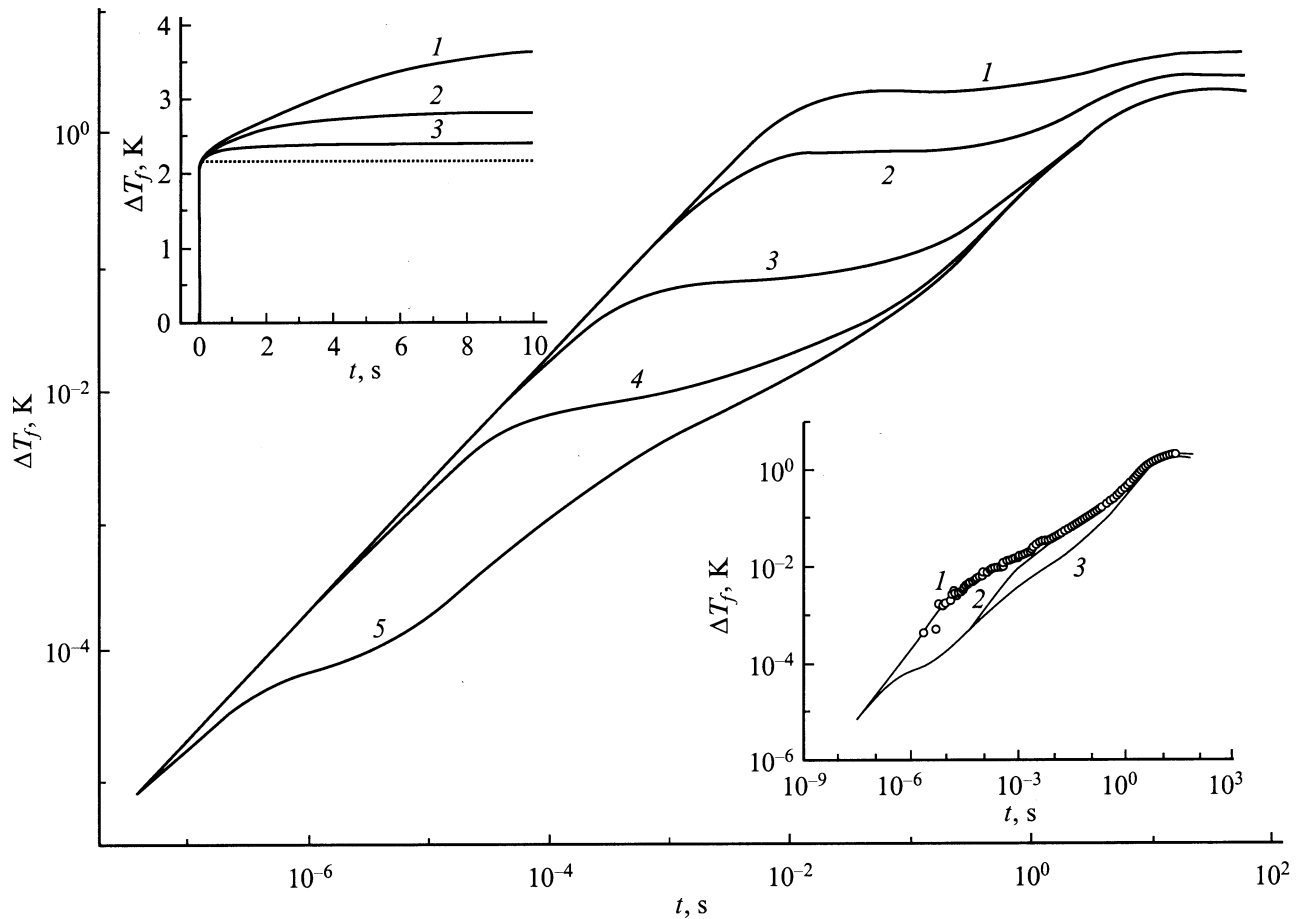
Наиболее привлекательной в этом плане оказывается возможность повышения величины теплового сопротивления на интерфейсе пленка–подложка. Поскольку теплоемкость пленки на три или более порядков меньше теплоемкости подложки, то следует ожидать, что при увеличении  $R_{fs}$  до величины порядка  $R_{st}$  температурная

амплитуда  $\Delta T_1$  по величине станет порядка  $\Delta T_3$ , а постоянная времени  $\tau_1$  при этом будет на несколько порядков меньше  $\tau_3$ . Изменение вида временной функции температуры пленки в зависимости от величины  $R_{fs}$  представлено на рис. 5 в двойном логарифмическом масштабе.

Нижние кривые на рис. 5 соответствуют типичным для материалов пленки и подложки параметрам, приведенным в первой строке таблицы. Кривые 1–4 отличаются от кривой 5 величиной теплового сопротивления  $R_{fs}$ , увеличенной в 100, 1000, 10 000 и 30 000 раз соответственно. В последнем случае  $R_{fs} = 147$  K/W, т.е. примерно равно  $R_{st}$ . Как видно, болометрическая структура в этом случае характеризуется примерно в 2 раза более высокой величиной отклика, чем обычная на нулевой частоте модуляции, и на три порядка более высоким быстродействием.

Вторая, менее яркая по результату возможность улучшения характеристик болометра может быть достигнута за счет уменьшения теплопроводности подложки. Эту возможность демонстрирует нижняя вставка на рис. 5. Кривая 3 на этом рисунке соответствует стандартным параметрам. Для кривой 2 коэффициент теплопроводности подложки уменьшен с 10.7 до 1.4 W/mK, а для кривой 1, кроме этого, снижена теплопроводность границы пленка–подложка с  $10^7$  до  $10^5$  W/m<sup>2</sup> · K. В результате температурная амплитуда отклика в диапазоне длительностей  $10^{-3} - 10^{-1}$  s для кривой 2 и  $10^{-6} - 10^{-1}$  s для кривой 1 увеличилась в 3–10 раз. Заметим, что кривая 1 соответствует параметрам изученной пленочной структуры  $\text{La}_{0.7}(\text{Pb}_{0.7}\text{Sr}_{0.3})_{0.3}\text{MnO}_3$  на подложке  $\text{LaAlO}_3$ . Таким образом, изменение теплопроводности подложки может быть использовано для корректировки характеристик болометра в связи с конкретным приложением. Вместе с тем эффект от изменения  $\lambda_s$  значительно слабее, чем от величины теплового сопротивления интерфейса пленка/подложка.

Недостатком вида функции  $\Delta T_f(t)$  на рис. 5 является наличие относительно большой амплитуды "медленного" отклика  $\Delta T_3$ . Это, в частности, приводит к нелинейности АЧХ и характерным искажениям сигнала при



**Рис. 5.** Изменение временной функции температуры нагрева пленки в зависимости от коэффициента теплопроводности интерфейса пленка-подложка ( $W/m^2 \cdot K$ ): 1 —  $3 \cdot 10^2$ , 2 —  $10^3$ , 3 —  $10^4$ , 4 —  $10^5$ , 5 —  $10^7$ . На верхней вставке — та же зависимость от коэффициента теплопроводности интерфейса подложка-термостат ( $W/m^2 \cdot K$ ): 1 — 300, 2 — 1000, 3 — 3000 при  $\lambda_{fs} = 300 W/m^2 \cdot K$ . Остальные параметры приведены в таблице (1-я строка). На нижней вставке — результат численного расчета температуры нагрева пленки с параметрами, приведенными в 1-й строке таблицы (кривая 3). Параметры кривой 1 отличаются значениями  $\lambda_s = 1.4 W/m \cdot K$  и  $\lambda_{fs} = 10^5 W/m^2 \cdot K$ , а кривой 2 —  $\lambda_s = 1.4 W/m \cdot K$ .

импульсном изменении уровня мощности. Улучшение АЧХ может быть достигнуто за счет согласованного выбора теплопроводности интерфейсов  $\lambda_{fs}$  и  $\lambda_{st}$ .

Изменение вида функции  $\Delta T_f(t)$  в зависимости от величины  $\lambda_{st}$  при постоянном  $\lambda_{fs} = 300 W/m^2 \cdot K$  приведено на верхней вставке к рис. 5. Пунктир на этой вставке отделяет по величине относительно быструю и медленную части отклика и демонстрирует оптимальный вид зависимости  $\Delta T_f(t)$  с линейной АЧХ.

Отметим, что величина  $\lambda_{st}$  порядка  $10^2 - 10^3 W/m^2 \cdot K$  обеспечивается клеями. Поэтому основная проблема создания оптимальных пленочных структур состоит в разработке технологии достаточно больших тепловых сопротивлений на интерфейсе пленка-подложка. В настоящее время известны лишь единичные примеры получения нужных по порядку величины значений теплопроводности интерфейса пленка-подложка  $\lambda_{fs}$  [5].

## Заключение

На основе импульсной микроволновой техники развит метод измерения тепловых кинетических коэффициентов в однослойных пленочных структурах. От других методов анализа болометрического отклика пленок он отличается количественным учетом не только временных, но и амплитудных характеристик температуры пленки в процессе ее нагрева, а от методов измерения ТКК тем, что пленка одновременно используется в качестве нагревателя и термометра.

Развитая выше методика измерений совместно с программой машинного расчета пригодна для проведения быстрой диагностики ТКК пленочных структур и контроля изменений, происходящих в переходном слое пленки в зависимости от различных технологических режимов. В целом она может быть полезна для оптимизации пленочных болометров по соотношению между вольт-

ваттной чувствительностью и быстродействием, а также для отделения вклада прямых тепловых эффектов при исследовании электродинамических явлений в полупроводниковых и металлических пленках и явлений вихревой динамики в сверхпроводящих пленках.

Работа поддержана Министерством образования и науки Украины (проект № 2М/71-2000) и Королевской академией наук Швеции.

## Список литературы

- [1] *Khartsev S.I., Johnsson P., Grishin A.M.* // J. Appl. Phys. 2000. Vol. 87. N 5. P. 2394–2399.
- [2] *Goyal A., Rajeswari M., Shreekala R. et al.* // Appl. Phys. Lett. 1997. Vol. 71 (17). 27. P. 2535–2537.
- [3] *Zang Z.M., Frenkel A.* // J. Superconductivity. 1994. Vol. 7. N 6. P. 871–884.
- [4] *Richards P.L.* // J. Appl. Phys. 1994. Vol. 76. N 1. P. 1–24.
- [5] *Prasher Ravi S., Phelan Patrick E.* // J. Superconductivity. 1997. Vol. 10. N 5. P. 473–484.
- [6] *Sergeev A.V., Semenov A.D., Kouminev P. et al.* // Phys. Rev. B. 1994. Vol. 49. P. 9091. Клоков А.Ю., Галкина Т.И., Плотников А.Ф. // ФТТ. 1988. Т. 40. С. 191.
- [7] *Гришин А.М., Медведев Ю.В., Николаенко Ю.М.* // ФТТ. 1999. Т. 41. Вып. 8. С. 1377–1384.
- [8] *Dekker C., Koch R.H., Gupta A.* // Physica C. 1991. Vol. 185–189. P. 1799–1800.
- [9] *Варламов Ю.Д., Волков А.Н., Предтеченский М.Р. и др.* // Сверхпроводимость. 1992. Т. 5. С. 1736–1745.
- [10] *Карлслю Г., Егер Д.* Теплопроводность твердых тел. М.: ГИФМЛ-Наука, 1964. 487 с.
- [11] *Michael Peter C., Trefny John U., Yasar Baki.* // J. Appl. Phys. 1992. Vol. 72. N 1. P. 107–109.
- [12] *Ramirez A.P., Schiffer P., Cheong S.W. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1996. Vol. 76. N 17. P. 3188–3191.
- [13] *Castro M., Burriel R., Cheong S.W.* // J. Magnetism and Magnetic Materials. 1999. Vol. 196–197. P. 512–514.
- [14] *Кожевников И.Г., Новицкий Л.А.* Теплофизические свойства материалов при низких температурах. М.: Машиностроение, 1982. 328 с.
- [15] *San I.Z., Abraham D.W., Rao R.A., Eom C.B.* // Appl. Phys. Lett. 1999. Vol. 74. P. 3017–3020.