

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
ИНСТИТУТ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА им. А. В. ЛЫКОВА
Журнал основан в январе 1958 г.

ИФЖ

И
НЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

JOURNAL
OF ENGINEERING PHYSICS
AND THERMOPHYSICS

Отдельный оттиск
Offprint

Том 95, № 4
Vol. 95, No. 4

ИЮЛЬ–АВГУСТ
JULY–AUGUST

2022

ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в январе 1958 г.

2022. ТОМ 95, № 4 (ИЮЛЬ–АВГУСТ)

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ПЕРЕНОСА

Цирлин А. М., Гагарина Л. Г. Распределение площади мембран и последовательность разделения многокомпонентных смесей в баромембранных системах.....863

ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОС В ДИСПЕРСНЫХ И ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

Шагапов В. Ш., Рафикова Г. Р., Каримова Г. Р. Динамика волн Стоунли на границе "вода–насыщенный водой или газогидратом песок".....869

Фейзуллаев Б. Х. Моделирование и исследование нестационарных полей давления и температуры в деформируемом пласте при фильтрации газоконденсатной смеси876

Филиппов А. И., Ахметова О. В., Ковальский А. А., Зеленова М. А., Унщиков Н. А. Пространственно-временные распределения давления в пласте и скважине при различных режимах отбора.....883

Аббасов Э. М., Агаева Н. А. Моделирование движения газа в системе пласт–трубопровод894

Филиппов А. И., Ахметова О. В. Фильтрационные волны905

Храмченков М. Г. Математическое моделирование растворения горных пород в ходе процессов карстообразования912

Тукмаков А. Л., Харьков В. В., Ахунев А. А. Пневматическая сепарация фракций полидисперсной газозвеси в низкоскоростном потоке.....918

Шалунов А. В., Хмелев В. Н., Терентьев С. А., Нестеров В. А. Выявление режимов и условий удаления влаги из материалов бесконтактным воздействием ультразвуковых колебаний.....925

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ТЕПЛООБМЕН В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Викулов А. Г. Единственность и устойчивость решения обратной задачи термоупругости. Часть 1. Постановка задачи.....934

ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОС В ПРОЦЕССАХ ГОРЕНИЯ

Булат П. В., Волков К. Н., Грачев Л. П., Есаков И. И., Лавров П. Б. Влияние давления и состава топливной смеси на ее воспламенение подкритическим струйным разрядом947

Жданова А. О., Захаревич А. В., Кузнецов Г. В., Пономарев К. О. Анализ эффективности комбинированных заградительных полос для локализации горения хвои и листвы.....955

НАНОСТРУКТУРЫ

Садовская Е. А., Полонина Е. Н., Леонович С. Н., Жданок С. А., Потапов В. В. Вязкость разрушения нанофибробетона при нормальном отрыве и поперечном сдвиге.....961

Ковшар С. Н., Полонина Е. Н., Жданок С. А., Леонович С. Н. Оценка седиментационной устойчивости комплексной нанодобавки969

Dey D. and Hazarika M. Entropy Generation Analysis of Al_2O_3 –Water Nanofluid Flow past a Permeable Cone under the Effect of Suction/Injection and Viscous Ohmic Dissipations.....977

Hamad A. J. and Ajeel R. K. Combined Effect of Oblique Ribs and a Nanofluid on the Thermal-Hydraulic Performance of a Corrugated Channel: Numerical Study.....985

ГИДРОГАЗОДИНАМИКА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Ингель Л. Х. О возмущениях геострофического течения, обусловленных объемными источниками плавучести и количества движения.....994

Пахомов М. А., Терехов В. И. Влияние формы импульсов на теплоперенос в точке торможения нестационарной осесимметричной импактной газокапельной струи	1000
Архипов В. А., Басалаев С. А., Поленчук С. Н., Усанина А. С. Экспериментальное исследование влияния вдува газа с поверхности твердой сферы на коэффициент сопротивления	1006
Ищенко А. Н., Буркин В. В., Дьячковский А. С., Рогаев К. С., Саммель А. Ю., Сидоров А. Д., Степанов Е. Ю., Чупашев А. В. Взаимодействие суперкавитирующих ударников с подводными преградами	1012
Kazak O. V. Method for Control of the Vortex Flow Intensity by Changing the Bottom Position in a DC Arc Furnace with a Bottom Electrode	1017

ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ

Долголенко Г. В., Курбанов Н. М., Оленович А. С., Скавыш В. С., Хведчин И. В., Савчин В. В. Пароводяной электродуговой плазматрон	1026
--	------

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Алифанов О. М., Будник С. А., Ненарокомов А. В., Нетелев А. В., Охупкин А. С. Исследование теплофизических свойств градиентных материалов методом обратных задач	1031
Ивакин Е. В., Толстик А. Л., Горбач Д. В., Станкевич А. А. Исследование теплопереноса в объемном и тонкопленочном образцах PbInTe методом динамических решеток	1042

ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА В РЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ

Баранов А. В. Неизотермическое течение неньютоновской жидкости в канале в условиях химических превращений	1048
--	------

ТЕПЛОПЕРЕНОС ПРИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ

Хузина Ф. Р., Русинов А. А., Салиева М. С., Красильников В. А., Набиуллин А. Р. Истечение вскипающей жидкости из трубчатого канала с учетом силы гидравлического трения	1054
--	------

КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА

Ни А. Э. Параллельная реализация гибридного решеточного метода Больцмана на графических ускорителях	1061
--	------

РАЗНОЕ

Гладков С. О., Карташов Э. М. К вопросу о температурной зависимости модуля Юнга магнитных материалов	1068
Сафаров Н. М. Разработка инновационного метода повышения нефтеотдачи глинизированных пластов	1074

ОБЗОР

Кот В. А. Метод Кармана–Польгаузена: критический анализ и новые решения для пограничного слоя на плоской пластине	1081
--	------

ЛЮДИ НАУКИ

К 85-летию Николая Владимировича Павлюкевича	1106
---	------

Ответственный за выпуск: Л. Н. Шемет

Подписано в печать 01.07.2022. Формат 60×84¹/₈. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 28,71. Уч.-изд. л. 26,24. Тираж 64 экз. Заказ № 126

Отпечатано в Республиканском унитарном предприятии "Издательский дом "Беларуская навука".
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий №1/18 от 02.08.2013.
ЛП № 02330/455 от 30.12.2013.

220141, г. Минск, ул. Ф. Скорины, 40

УДК 548.4+620.162:(549.233+549.252+549.251)

*Е. В. Ивакин, А. Л. Толстик, Д. В. Горбач, А. А. Станкевич***ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ОБЪЕМНОМ И ТОНКОПЛЕНОЧНОМ ОБРАЗЦАХ $PbInTe$ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕШЕТОК**

Проведены измерения температуропроводности тонких и объемных образцов теллурида свинца, легированных индием, с использованием модифицированного метода динамических решеток. Для записи тепловых решеток использовалось импульсное лазерное излучение длительностью 20 нс на длине волны 532 нм. Восстановление динамических решеток осуществлялось на длине волны 635 нм непрерывным лазерным излучением. Анализ кинетики сигнала дифракции позволил определить время жизни тепловых динамических решеток, записываемых в исследуемых образцах. Показано, что использование дополнительного поля гомодина, когерентного по отношению к полю сигнала дифракции, позволяет усилить и отфильтровать выбранную информационную компоненту. На основании зарегистрированных кинетических зависимостей интенсивности дифрагированного сигнала определена температуропроводность объемных и тонкопленочных образцов теллурида свинца, легированного индием. Установлено, что для пленки микронной толщины температуропроводность на десять процентов ниже, чем для объемного образца. Исследована зависимость теплопереноса в указанных образцах от их температуры и показано, что увеличение температуры образцов в диапазоне от 40 до 95°С приводит к двадцатипроцентному уменьшению их температуропроводности.

Ключевые слова: термоэлектрик, теллурид свинца, теплоперенос, теплопроводность, температуропроводность, фазовая селекция, термоотклик.

Введение. Транспортные эффекты в термоэлектриках на основе $PbTe$ интенсивно исследуются ввиду перспективности применения этих материалов в технологиях возобновляемой энергетики [1, 2]. В последнее время внимание специалистов привлекает теллурид свинца, легированный индием [3], поскольку он обладает рядом положительных эксплуатационных качеств.

В настоящей работе исследована температуропроводность образцов поликристаллического теллурида свинца $Pb_{0.9995}In_{0.0005}Te$ в объемном и пленочном исполнении. Синтез и подготовка объемных образцов к исследованию проводились по технологии, изложенной в работе [3]. Объектом исследования служил диск толщиной 2 мм, вырезанный из синтезированного материала, с поверхностью, полированной до оптического качества. Пленочные образцы были получены из того же исходного материала путем испарения в вакууме [4, 5]. В работе [3] показано, что теплопроводность объемного образца поликристаллического теллурида свинца составляет ~ 0.020 Вт/(см · К) при температуре 40–50°С, что, при типичной для теллурида свинца объемной теплоемкости 1.24 Дж/(см³ · К), соответствует температуропроводности 0.016 см²/с. В работе [6] был исследован объемный монокристалл $PbTe$ и было установлено, что его температуропроводность при комнатной температуре равна 0.018 см²/с. В [7] температуропроводность монокристаллической пленки $PbTe$ толщиной 5 мкм, выращенной на поверхности монокристалла BaF_2 , при комнатной температуре была определена равной 0.013 см²/с. Такое снижение температуропроводности $PbTe$ авторы объяснили большой концентрацией дислокаций в пленке (более 10^8 см⁻² согласно электронно-микроскопическому контролю) из-за несогласованности атомных решеток подложки и пленки и связанного с этим большого уровня фононного рассеяния.

Тепловые динамические решетки поверхностного типа. В настоящей работе температуропроводность образцов $Pb_{0.9995}In_{0.0005}Te$ измерялась методом динамических решеток (ДР), который можно рассматривать как аналог известного метода модуляционной спектроскопии [8–10], но в котором модуляция

Белорусский государственный университет. 220030, г. Минск, просп. Независимости, 4; э-почта: tolstik@bsu.by. Поступила 06.05.2021.

мощности возбуждения материала происходит не во времени, а в пространстве. Метод ДР основан на записи дифракционной решетки в образце, осуществляемой за счет термооптических эффектов, инициируемых на поверхности образца интерференционным полем двух когерентных пучков света от импульсного лазера в полосе поглощения материала образца (рис. 1). В узкозонном полупроводнике, каковым является теллурид свинца, коэффициент поглощения на длине волны возбуждения 532 нм составляет примерно $0.5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-1}$ и, следовательно, реализуется импульсный нагрев поверхностного слоя полупроводника толщиной около 20 нм. В зону возбуждения материала образца направлялось также излучение непрерывного лазера на длине волны 635 нм для формирования сигнала дифракции и его детектирования с временным разрешением. Схема экспериментальной установки приведена в работе [11], где исследован теплоперенос в пленках теллурида свинца с примесью сурьмы и висмута. Сигнал дифракции регистрировался в геометрии на отражение. Результат его фотометрирования использовался затем для расчета искомого параметра материала.

Регистрация сигнала дифракции в геометрии на отражение. Хорошо известно, что нагрев оптического материала в результате поглощения им лазерного излучения приводит к изменению его комплексной диэлектрической проницаемости и к деформации поверхности материала. При пространственно модулированном воздействии на образец в нем, в результате действия указанных термоиндуцированных эффектов, формируются одновременно несколько динамических решеток различной физической природы — фазовой и амплитудной решеток термоотражения, а также фазовой рельефной решетки. При таком множественном отклике образца на лазерное воздействие для обработки результатов эксперимента необходимо выделение одной компоненты термоотклика, позволяющей наиболее достоверно определить температуропроводность образца. Решение этой задачи в рамках метода ДР стало возможным благодаря применению дополнительного светового пучка — пучка гомодина, коллинеарного и когерентного пучку, дифрагированному на динамической решетке образца. Оба пучка совмещаются и интерферируют на фотоприемнике.

Селектирующее действие поля гомодина реализуется следующим образом. В простейшем случае одного экспоненциально затухающего сигнала $E_d(t) = E_d(0) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$ и постоянного поля гомодина $E_b(t) = E_b$ интенсивность на детекторе $|E_d(t) + E_b(t)|^2$ записывается в виде суммы трех слагаемых, два из которых описывают затухающие процессы с временами релаксации $\tau/2$ и τ :

$$I_d(t) = I_b + I_d(0) \exp\left(-\frac{2t}{\tau}\right) + 2\sqrt{I_b I_d(0)} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \cos \Delta\varphi. \quad (1)$$

Амплитуда искомого сигнала, описываемая последним слагаемым в выражении (1), зависит от двух параметров: интенсивности поля гомодина и разности фаз между двумя взаимодействующими полями. При этом разность фаз $\Delta\varphi$ должна быть регулируемым параметром. Чтобы выделить одну компоненту дифракции и исключить из рассмотрения сопутствующие сигналы необходимо последовательно регистрировать две кинетики двух интерферирующих полей с разностью фаз $\Delta\varphi = 0$ и π , а затем вычесть одну кинетику из другой. Разностный сигнал $I_{d1}(t) - I_{d2}(t) = 4\sqrt{I_b I_d(0)} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$ позволяет выделить и усилить искомую компоненту дифрагированного сигнала с временем релаксации τ .

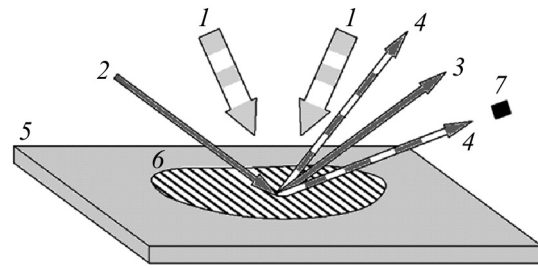


Рис. 1. Схема реализации метода динамических решеток: 1 — когерентные пучки импульсного излучения, создающие динамическую решетку; 2 — зондирующий пучок; 3, 4 — пучки, дифрагированные в нулевой и первый порядок соответственно; 5 — образец; 6 — динамическая решетка; 7 — фотоприемник

Формирование дифракционного отклика поверхностной тепловой решетки на лазерное импульсное воздействие. На рис. 2 представлены сигналы дифракции для пленки $\text{Pb}_{0.9995}\text{In}_{0.0005}\text{Te}$ толщиной 1.7 мкм на стекле при задании различных разностей фаз между полями гомодина и дифракции. Наличие гомодина обеспечивает выборочную селекцию и усиление сигналов дифракции различной физической природы. На указанном рисунке 1 и 3 отражают кинетики процесса дифракции зондирующего пучка на двух фазовых решетках, сформированных на поверхности пленки вследствие образования поверхностного рельефа и термического изменения фазовой части комплексного показателя преломления в тонком приповерхностном слое пленки. Поля дифракции на фазовых решетках рельефного типа и поле термоотражения, присутствуя одновременно, затухают каждый по своему закону и находятся в противофазе по отношению друг к другу. Постепенный рост сигнала дифракции в начальной части кинетик 1 и 3 длительностью примерно 400–500 нс является следствием затухания фазовой поверхностной решетки термоотражения. После ее затухания остается только одна кинетика процесса дифракции зондирующего пучка на решетке поверхностно-рельефного типа. Кинетика 2 сформирована благодаря термоиндуцированному изменению амплитудной компоненты комплексной диэлектрической постоянной на поверхности пленки. Эта кинетика получена полностью в тех же условиях, что и кинетика 1 за исключением того, что разность фаз полей дифракции и гомодина установлена равной $\pi/2$. Такое изменение кинетики процесса дифракции зондирующего пучка (т. е. исчезновение ее компоненты 1 и появление компоненты 2) обусловлено известным явлением сдвига фазы поля дифракции на фазовой решетке на $\pi/2$ по отношению к полю дифракции на решетке амплитудного типа. В этом случае поля гомодина и дифракции синфазны по отношению друг к другу и, следовательно, усиливают регистрируемый сигнал. Кинетика 4 — это та же кинетика, что и кинетика 2, но при разности фаз двух полей $\Delta\varphi = \pi/2 + \pi$.

На рис. 3 представлены кинетики дифрагированного сигнала для двух вариантов записи динамической решетки в пленке PbInTe . Поле гомодина отсутствует. Видно, что сигнал при записи решетки со стороны воздуха выше сигнала, полученного при записи решетки со стороны стеклянной подложки. Такую закономерность можно объяснить тем, что при облучении образца со стороны подложки динамическая решетка формируется только за счет термоиндуцированного изменения комплексной диэлектрической постоянной на поверхности пленки, поскольку контакт пленка–стекло препятствует формированию

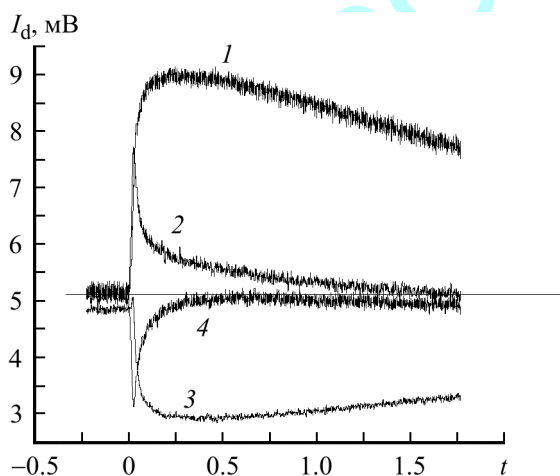


Рис. 2. Сигналы дифракции в пленке $\text{Pb}_{0.9995}\text{In}_{0.0005}\text{Te}$ толщиной 1.7 мкм на стекле с решеткой периодом $\Lambda = 12.5$ мкм при $\Delta\varphi = 0$ (1), $\pi/2$ (2), π (3) и $3/2\pi$ (4): горизонтальная линия — постоянная мощность пучка гомодина

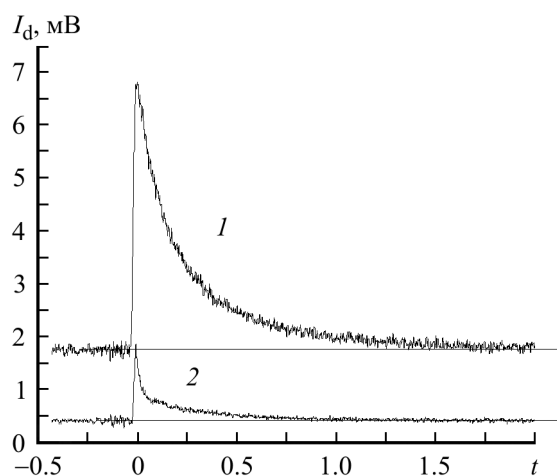


Рис. 3. Кинетики затухания сигнала дифракции при возбуждении–зондировании поверхности пленки PbInTe толщиной 1.7 мкм на стекле со стороны воздуха (1) и со стороны подложки (2)

поверхностного рельефа. Таким образом, можно констатировать, что относительно низкая амплитуда дифракции на динамической решетке поверхностного термоотражения, а также возможность фазовой селекции сигнала дифракции за счет применения поля гомодина — это факторы, которые могут в совокупности обеспечить достоверность получаемых значений температуропроводности материала.

Измерение температуропроводности объемных и пленочных образцов при различных температурах. Результаты описанных исследований использованы для количественного изучения теплопереноса в теллуриде свинца, допированного индием. Поскольку, как показано выше, основную роль в формировании сигнала дифракции при облучении образца со стороны пленки играет поверхностно-рельефная тепловая решетка, временная зависимость высоты созданного рельефа описывается соотношением [12]

$$H(t) = H(0) \operatorname{erfc}(\sqrt{t/\tau}), \quad (2)$$

где erfc — дополнительная функция ошибок, $H(0)$ — начальная амплитуда рельефа, $\tau = \Lambda^2/4\pi^2\chi$. Соотношение (2) применимо только при поглощении поверхностью образца возбуждающего излучения и когда скорости теплопереноса в образце в направлениях вдоль вектора динамической решетки и вдоль нормали к поверхности образца одинаковые.

В соответствие с вышеизложенным, процедура определения величины τ включала три действия: усиление сигнала дифракции от фазовой решетки путем установки разности фаз полей гомодина и дифракции 0 и π , суммирование двух зарегистрированных кинетик и сдвиг начальной точки, от которой начинается сопоставление теории и эксперимента на 200 нс относительно лазерного импульса для минимизации вклада фазовой решетки поверхностного термоотражения.

Измерение температуропроводности образца χ методом динамических решеток дает ее значение, усредненное по толщине слоя $h = \Lambda/\pi$, поскольку на такую глубину проникает тепло, выделившееся в образце за время наблюдения сигнала дифракции [12]. Тестирование объемного образца $\text{Pb}_{0.9995}\text{In}_{0.0005}\text{Te}$ при периодах динамической решетки 25 , 12.5 и 5 мкм показали, что температуропроводность материала образца при температуре 40°C лежит в диапазоне $0.018 \text{ см}^2/\text{с} \pm 7\%$ и остается постоянной до глубины по крайней мере $h = 8$ мкм. Это свидетельствует о термической однородности материала образца по нормали к его поверхности.

Существенным фактором в работе термоэлектриков на основе полупроводника PbTe является зависимость их термоэлектрической добротности от температуры T , в частности, из-за зависимости параметров теплопереноса от температуры. Ранее на это обстоятельство обращено внимание при исследовании объемных образцов соединений теллурида свинца с индием $\text{Pb}_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$ [3].

Исследование зависимости температуропроводности $\chi(T)$ объемных образцов $\text{Pb}_{0.9995}\text{In}_{0.0005}\text{Te}$, выполнено при периоде динамической решетки 12.5 мкм. На рис. 4 приведены две кинетики, полученные при двух температурах образца — 40 и 95°C . Видно увеличение времени релаксации решетки при повышении температуры. Время жизни тепловой решетки и температуропроводность образца при температуре $T = 40^\circ\text{C}$ составляют $\tau = 2.18$ мкс и $\chi = 1.80 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$ (кинетика 2), а при $T = 95^\circ\text{C}$ — $\tau = 2.91$ мкс и $\chi = 1.36 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$ (кинетика 1).

Результаты измерений сведены в табл. 1. Для сравнения приведены также результаты работы [3], полученные при исследовании аналогичного объемного образца методом Паркера с использованием устройства LFA 457 MicroFlash (Netzsch).

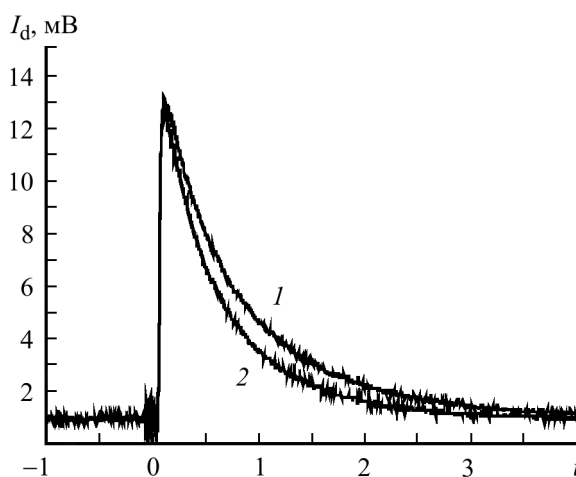


Рис. 4. Кинетики затухания сигнала дифракции в объемном образце $\text{Pb}_{0.9995}\text{In}_{0.0005}\text{Te}$ при $T = 95$ (1) и 40°C (2)

Таблица 1. Результаты измерения температуропроводности объемного образца $Pb_{0.9995}In_{0.0005}Te$ и пленки того же состава толщиной 1.7 мкм на стекле различными методами

Метод измерения	$T, ^\circ C$		
	40	75	95
	$\chi, \text{см}^2/\text{с}$		
Метод Паркера [3], объемный образец $Pb_{0.9995}In_{0.0005}Te$	0.016	0.014	0.013
Метод ДР ($\Lambda=12.5$ мкм), объемный образец $Pb_{0.9995}In_{0.0005}Te$	0.018	0.015	0.014
Метод ДР ($\Lambda=5$ мкм), пленка $Pb_{0.9995}In_{0.0005}Te$ на стекле	0.016	0.013	0.013

Заключение. Экспериментально установлено, что применение поля гомодина с регулируемой фазой и интенсивностью, сравнимой с интенсивностью поля дифракции, позволяет выделить компоненту дифракции, обусловленную формированием поверхностно-рельефной фазовой решетки, дающей наибольший вклад в сигнал дифракции. С использованием разработанной методики показано, что увеличение температуры исследованных образцов объемного и пленочного типов в диапазоне от 40 до 95⁰С приводит к двадцатипроцентному уменьшению их температуропроводности χ . Показано уменьшение значения χ на величину порядка десяти процентов при переходе от объемного образца к пленочному. Отсутствие в используемом методе механического контакта с исследуемым образцом является критически важным при диагностике тонкопленочных объектов, что открывает широкие перспективы его применения для оперативного получения информации при синтезировании новых пленочных структур.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Ф19УКРГ-009). Авторы выражают благодарность сотрудникам Прикарпатского национального университета им. В. Стефаника Б. С. Дзундзе и Я. С. Яворскому за предоставление образцов для исследований, а также сотруднику кафедры физики твердого тела БГУ Г. В. Кедровской за качественную подготовку образцов. Наша особая признательность профессору З. М. Дашевскому за полезные дискуссии и рекомендации по содержанию и структуре статьи.

Обозначения

I_d — интенсивность дифракции; I_b — интенсивность поля гомодина; T — температура; t — время; τ — время жизни динамической решетки; $\Delta\varphi$ — разность фаз между дифрагированным полем и полем гомодина; χ — температуропроводность. Индексы: b — базовый; d — дифракция.

Литература

1. **Lubomirsky I. and Stafsudd O.** Practical guide for pyroelectric measurements *Rev. Sci. Instrum.* 2012. Vol. 83. Article ID 051101.
2. **Kungumadevi L. and Sathyamoorthy R.** Structural, electrical and optical properties of PbTe thin films prepared by simple flash evaporation method. *Adv. Condens. Matter Phys.* 2012. Article ID 763209.
3. **Parashchuk T., Dashevsky Z., and Wojciechowski K.** Feasibility of a high stable PbTe:In semiconductor for thermoelectric energy applications. *J. Appl. Phys.* 2019. Vol. 125, No. 24. Article ID 245103.
4. **Parashchuk T., Kostyuk O., Nykyruy L., and Dashevsky Z.** High thermoelectric performance of *p*-type Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃ films on flexible substrate. *Mater. Chem. Phys.* 2020. Vol. 253. Article ID 123427.
5. **Dzundza B., Nykyruy L., Parashchuk T., Ivakin E., Yavorsky Y., Chernyak L., and Dashevsky Z.** Transport and thermoelectric performance of *n*-type PbTe films. *Physica B.* 2020. Vol. 588. Article ID 412178.
6. **Schmidt A. J., Chen X., and Chen G.** Pulse accumulation, radial heat conduction, and anisotropic thermal conductivity in pump-probe transient thermoreflectance. *Rev. Sci. Instrum.* 2008. Vol. 79, No. 11. Article ID 114902.
7. **Johnson J. A., Maznev A. A., Nelson K. A., Bulsara M. T., Fitzgerald E. A., Harman T. C., Calawa S., Vineis C. J., and Turner G.** Phase-controlled heterodyne laser-induced transient grating measurements of the normal transport properties in opaque material. *J. Appl. Phys.* 2012. Vol. 111. Article ID 023503.

8. **Roger J. P., Lepoutre F., Fournier D., and Voccaro A. C.** Thermal diffusivity measurement of micron-thick semiconductor films by mirage detection. *Thin Solid Films*. 1987. Vol. 155. Pp. 165–174.
9. **Магунов А. Н.** *Лазерная термометрия твердых тел*. Москва: Физматлит, 2002.
10. **Григуль В., Хауф У.** *Оптические методы в теплопередаче*. Москва: Мир, 1973.
11. **Ivakin E. V., Kisialiou I. G., Nykyruy L. I., and Yavorskyu Y. S.** Optical studies of heat transfer in PbTe:Bi(Sb) thin films. *Semiconductors*. 2018. Vol. 52, No. 13. Pp. 1691–1695.
12. **Kading O. W., Skurk H., Maznev A. A., and Matthias E.** Transient thermal gratings at surfaces for thermal characterization of bulk materials and thin films. *Appl. Phys. A*. 1995. Vol. 61. Pp. 253–261.

АВТОРСКИЙ ОТТИСК