

Отзыв

официального оппонента на диссертационную работу

Калугиной Ольги Николаевны

«ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ТЕПЛОВОЙ ВОЛНЫ»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Актуальность темы диссертации обусловлена, на наш взгляд, двумя обстоятельствами. Во-первых, это широкое применение в современной электронике тонкопленочных и многослойных структур, подверженных воздействию тепловых потоков. Во-вторых, это необходимость в достоверных и оперативных методах оценки тепловых характеристик таких структур, в том числе вновь разрабатываемых. Рецензируемая диссертация посвящена разработке, обоснованию и проверке такого метода. Подтверждением актуальности тематики диссертации можно считать тот факт, что работа выполнялась в соответствии с государственными научными программами (гос. задание Минобрнауки РФ и т.п.).

Краткий анализ содержания работы.

Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы.

Введение традиционно включает обоснование актуальности исследования, формулировку цели и задач работы. Приводятся необходимые формальные сведения о работе: научная новизна, теоретическая и практическая значимость (как они представляются автору), положения, выносимые на защиту, сведения об апробации результатов, личном вкладе автора, структура работы.

Первая глава содержит обзор современного состояния вопроса, а именно – математических методов описания процессов теплопроводности, методов и технических средств определения тепловых характеристик систем (коэффициентов теплопроводности и температуропроводности). На основании обзора ставится цель и задачи исследования.

Производит положительное впечатление подробное рассмотрение граничных и начальных условий, необходимых для придания физического содержания чисто математической задаче решения дифференциальных уравнений теплопроводности. Очевидно, что от правильного выбора краевых условий зависит достоверность полученных решений, так что их тщательный анализ, выполненный автором, совершенно оправдан и необходим для достижения этой достоверности.

Далее в обзоре рассматриваются существующие методы определения коэффициента температуропроводности, что также необходимо, коль скоро целью работы заявлена разработка нового подхода к определению тепловых характеристик материалов.

А вот раздел 1.3 первой главы содержит, на наш взгляд, много лишней, подчас общеизвестной информации, не связанной непосредственно с целью и

задачами исследования. Сюда можно отнести характеристики наноматериалов, общие характеристики пленок (таблица 1.1), методы их получения.

Чего не хватает в первой главе, так это обзора исследований по распространению тепла через границы раздела твердых тел и отдельных фаз, в том числе теоретических и экспериментальных исследований рассеяния фононов на этих границах. Совершенно очевидно, что такое рассеяние имеет место, и подобные работы имеются, в том числе обзорного характера.

И еще один аспект хотелось бы видеть проанализированным в обзоре. Коль скоро одним из результатов работы является установление зависимости коэффициента температуропроводности от толщины пленки (п. 7 раздела «Заключение и выводы»), крайне желательно было бы проанализировать работы предшественников по этому вопросу.

Вторая глава занимает центральное место в диссертации. В ней содержится новое значимое теоретическое решение задачи о распространении тепла в диэлектрической среде при различных граничных условиях. Однако начало главы является, по сути, продолжением литературного обзора (раздел 2.1, который уместнее смотрелся бы в главе 1). Также приводятся сведения, не относящиеся непосредственно к теме диссертации и не используемые в дальнейшем. Это относится, например, к описанию, в общем-то, известной технологии дискретизации аналогового сигнала (стр. 58 – 59), или $1/f$ - шума (стр. 60).

Решение дифференциальных уравнений теплопроводности позволило автору рассчитать распределение температуры по глубине образца и оценить глубину проникновения тепловой волны. Здесь же получен важный (можно сказать, главный) научный результат: установлена зависимость формы пироотклика от частоты модуляции теплового потока. На основании полученного решения предложена зависимость для определения коэффициента температуропроводности (ф-ла (2.13)), составляющая теоретическую основу предложенного автором метода.

В этой же главе получено решение дифференциального уравнения теплопроводности для слоистой (двухслойной) среды, на основании чего проанализировано влияние относительной толщины пленки на форму пироотклика. Этот результат представляет самостоятельное теоретическое значение.

Автор не выделяет описание методики эксперимента и экспериментальных средств в отдельную главу, посвятив эти вопросам лишь один раздел 2.3 в главе 2. Такой лаконизм затрудняет получение полного представления об экспериментальной установке и методике проведения измерений. По существу, читателю предлагается оценить экспериментальную установку только на основании рис. 2.11 и отчасти рис. 2.12, но последний относится скорее к методике обработки пиросигнала. Непонятно, как осуществлялся контакт образца с подложкой, как обеспечивался плотный тепловой контакт, как обработаны контактирующие поверхности образца и подложки, и т.д.

В связи с этим, возникают вопросы, касающиеся обоснованности граничных условий (2.17), а именно $\Theta_1|_{x=d} = \Theta_2|_{x=d}$. Это же относится к граничному

условию (2.21) $\Theta_j|_{x=d_j} = \Theta_{j+1}|_{x=d_j}$. Как уже отмечалось ранее, очевидно, что граница раздела твердых тел или двух фаз приводит к отражению фононов и возникновению термического сопротивления интерфейса. Отсутствие хотя бы оценочных значений температурного скачка на границе является недостатком выполненного анализа распространения теплового потока через слоистую среду.

Третья глава посвящена практической реализации предложенного в главе 2 метода определения коэффициента температуропроводности на примере пленки керамики цирконата - титаната свинца на кремниевой подложке. Экспериментальные результаты убедительно подтверждают достоверность теоретических предпосылок предложенного метода.

В этой же главе автор исследует масштабный фактор и приводит эмпирическую зависимость коэффициента температуропроводности от толщины образца (формулы (3.1) и (3.2)). На наш взгляд, с физической точки зрения предпочтительна экспоненциальная зависимость (формула (3.1)).

Не сомневаясь в наличии масштабного фактора для тепловых характеристик материалов, позволю себе не согласиться с автором в интерпретации его физической природы в исследованных структурах. В тексте диссертации и автореферата неоднократно (с незначительными вариациями) выдвигается в качестве одной из причин влияния толщины пленки на коэффициент температуропроводности то, что (цитата) «число свободных колебаний в веществе (т.е. фононов), а значит и *вероятность их рассеяния*, определяется числом атомов в образце, и, следовательно, геометрическими размерами образца» (напр., стр.3, стр. 92 диссертации). Но в таком случае коэффициенты теплопроводности и температуропроводности вообще не имеют смысла как константы вещества. Даже если принять точку зрения автора, то на величину указанных коэффициентов должен влиять именно объем, т.е. все три размера образца в равной степени. Тогда необоснованным выглядит утверждение (цитата): «естественно предположить, что температуропроводность также зависит от размеров исследуемого объекта, и в первую очередь от его толщины» (стр. 92-93). На каком основании из трех измерений выделяется именно толщина?

Очевидно, что масштабный эффект в виде влияния толщины пленки должен проявляться при толщинах, сравнимых с длиной свободного пробега фононов, но даже самые тонкие из исследованных пленок имеют гораздо большую толщину.

Остается, на наш взгляд, одна причина зависимости тепловых свойств пленок от их толщины, которую автор приводит на стр. 93 – это зависимость структуры пленки (концентрации дефектов, размеров зерен, и т.д.) от ее толщины.

Степень обоснованности и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, в общем и целом сомнений не вызывает. Такая уверенность базируется на корректной постановке задач, корректной формулировке и тщательном анализе краевых условий (в рам-

ках принятых исходных предпосылок), подтверждении теоретических расчетов экспериментальными результатами. Возможные источники экспериментальных погрешностей также достаточно полно проанализированы автором.

Научная общественность информирована о результатах данной диссертационной работы, которые опубликованы в авторитетных рецензируемых российских и международных изданиях и доложены на представительных конференциях.

Наиболее существенные новые научные результаты, полученные автором, на наш взгляд, следующие:

1. Комплексное теоретическое обоснование и экспериментальная проверка методики определения коэффициентов температуропроводности и теплопроводности диэлектрических материалов, в том числе слоистых сред, методом тепловой волны с анализом пироотклика.

2. Математическое описание процесса распространения тепловой волны в слоистых системах с различными теплофизическими характеристиками.

Практическая значимость разработанной методики очевидна, так как в распоряжении экспериментаторов появился еще один метод определения тепловых характеристик материалов.

Общие замечания по работе.

Помимо приведенных выше при анализе содержания диссертации конкретных замечаний имеется ряд замечаний общего характера.

1. В уравнениях (3.1) и (3.2) не указано, в каких единицах подставлять в них значение толщины. Число значащих цифр в числовых коэффициентах этих уравнений лишено всякого физического смысла.

2. Непонятно, что имелось в виду под термином «экстраполяция» в подрисуночной подписи к рис. 3.11? Как раз экстраполяции на рисунке нет, а есть интерполяция.

3. Следовало бы более конкретно указать границы применимости уравнений (3.1) и (3.2).

4. Смысл рис. 3.12 непонятен. Такое впечатление, что на нем отсутствует часть информации (а может и вся информация).

5. В п. 7 раздела «Заключение и выводы» написано (цитата): «Установлено уменьшение (по экспоненциальному закону) коэффициента температуропроводности пленок на основе керамики цирконата-титаната свинца», а на рис. 3.11 показано его увеличение.

6. На стр. 65 даны неверные ссылки на уравнения (2.16) и (2.17). Очевидно, имелись в виду уравнения (2.18) и (2.19).

7. Рис. 2.6 в отсутствует. Очевидно, имелся в виду рис. 2.6 б. То же относительно рис. 2.8 а,б,в. Имеются рис. 2.8 а,б,с.

Заключение.

Несмотря на сделанные замечания, неизбежные при оценке любой диссертационной работы, диссертация О.Н. Калугиной, безусловно, заслуживает положительной оценки. Диссертация содержит все необходимые признаки, преду-

смотренные п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», выполнена на высоком научном уровне, содержит новые научные результаты и имеет практическую значимость.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации и позволяет составить адекватное представление о выполненных исследованиях. Язык и стиль диссертации соответствуют нормам научно-технических публикаций.

Считаю, что диссертация Калугиной Ольги Николаевны представляет собой научно-квалификационную работу, в которой содержится разработка нового метода определения тепловых характеристик материалов на основе пирозлектрических измерений. На основании вышеизложенного результаты диссертации О.Н. Калугиной могут рассматриваться как вклад в развитие такой фундаментальной научной дисциплины, как физика конденсированного состояния. Тем самым диссертация соответствует требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», а автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

профессор кафедры прикладной физики

ФГБОУ ВО Тверской государственный технический университет,

доктор технических наук, профессор

Измайлов Владимир Васильевич

2016

170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, ТвГТУ

Тел. (4822)78-88-80, email: iz2v@tvcom.ru