

## УТВЕРЖДАЮ

Ректор Российско-Таджикского  
(Славянского) университета  
д.э.н., профессор

Файзулло М.К.



«27» февраля 2025 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертации Абдурахмонова Абдурахмона Абдулкадимовича «Особенности формирования стационарного поля температуры и генерации тепловых волн в пленках диэлектриков в поле непрерывного гармонически модулированного пучка ионов», представляемой на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 - Физика конденсированного состояния.

**Актуальность темы диссертации.** Выполненный нами анализ актуальности темы диссертационной работы показывает, что, несмотря на наличие достаточного количества публикаций по вопросам взаимодействия потока ионов с конденсированными средами, включая твёрдые диэлектрики, многие аспекты этого взаимодействия остаются актуальными. Это связано с тем, что в процессе облучения исходного образца потоком заряженных частиц с различными энергиями и плотностями тока происходит целый ряд неравновесных процессов, что и обуславливает необходимость детального и всестороннего исследования механизмов их развития. Очевидно, что при этом происходит существенный нагрев поверхности образца, который затем распространяется по всему образцу в соответствии с диффузионным законом. Оказалось, что возможны случаи, когда падающий пучок ионов изменяется по гармоническому закону с частотой, что приведёт к возбуждению линейных и нелинейных тепловых волн в образце. Оказалось, что к настоящему времени достаточно хорошо развиты линейные теории генерации тепловых волн, однако отсутствуют работы, посвящённые генерации нелинейной тепловой волны, вызванной модулированным пучком ионов. Также не исследовано влияние тепловой нелинейности (ТН) на формирование стационарного температурного поля (ТП) в плёнках диэлектриков при облучении непрерывным пучком ионов. Следовательно, теоретическое исследование особенностей генерации линейных и нелинейных тепловых волн в плёнках диэлектриков, облучаемых модулированным пучком ионов, является весьма актуальной задачей.

**Научная новизна.** Автором теоретически исследовано влияние ТН теплофизических свойств и степени черноты на формирование

стационарного температурного поля в поле непрерывного потока ионов, а также предложена теория генерации линейных и нелинейных тепловых волн в пленках диэлектриков посредством гармонически модулированного потока ионов. Также исследовано влияние ТН твёрдой подложки на эти характеристики.

**Личный вклад автора** заключается в следующем: непосредственное участие в подготовке обзорной части диссертационной работы, поиске и обосновании актуальности темы исследования; участие в поиске теоретического и экспериментального материала, формулировке математических моделей поставленных задач и получении их решений; все численные расчёты выполнены лично соискателем; апробация и подготовка научных статей в рамках темы исследования.

**Обоснованность и достоверность полученных результатов и сформулированных рекомендаций.** Все полученные результаты, представленные в диссертационной работе, безусловно достоверны и обоснованы. Обоснованность и достоверность полученных результатов заключается в корректности поставленных задач, правильности использованных методик решений, а также в точности и достоверности найденных аналитических и численных решений. В частности, это включает получение аналитических выражений, описывающих особенности генерации линейных и нелинейных тепловых волн в плёнках диэлектриков для двух случаев (без подложки и с подложкой), а также аналитическое выражение для амплитуды и фазы основной и второй гармоник нелинейной тепловой волны в этих образцах.

**Научная и практическая значимость результатов.** Научно-практическая важность результатов диссертационной работы заключается в том, что аналитически полученные выражения для температурного поля в диэлектрических плёнках позволяют определить пространственное распределение температуры этих систем при их облучении непрерывным потоком ионов. Предложенная теория генерации линейных и нелинейных тепловых волн позволяет определить теплофизические величины и степень черноты этих систем, а также их термические коэффициенты.

#### **Общая характеристика работы**

**Оценка диссертации.** По своей структуре, содержанию и объёму диссертационная работа выполнена и подготовлена в соответствии с установленными стандартами и нормами. Она состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка цитируемой литературы. Диссертационная работа изложена на 111 страницах, включает 28 рисунков и список литературы из 112 наименований.

**В первой главе** диссертационной работы приведён краткий обзор теплофизических аспектов взаимодействия пучка ионов с диэлектрическими материалами. Эта глава состоит из четырёх разделов. Параграф 1.1 посвящён изложению результатов, полученных для случая прямоугольной формы импульса ионов. Определение и описание особенностей распространения тепловых волн в конденсированных средах приведены в §1.2. Изложение особенностей возбуждения и распространения температурных волн прямоугольной формы в конденсированных средах представлено в §1.3. В §1.4 выполнен краткий анализ существующих работ по нелинейным температурным волнам.

**Вторая глава** посвящена теоретическому исследованию влияния температурной зависимости теплофизических величин и степени черноты на особенности формирования стационарного температурного поля в диэлектрических плёнках без подложки и с подложкой при их облучении непрерывным ионным пучком. Глава состоит из четырёх разделов. В §2.1 теоретически исследовано влияние температурной зависимости теплофизических величин и степени черноты на температурное поле диэлектриков в поле непрерывного пучка ионов для следующих случаев: 1) облучение образца проводится на воздухе; 2) образец прикреплён на массивной подложке, вторая поверхность которой погружена в воду, а облучение проводится в вакууме; 3) образец находится на подложке, и облучение проводится на воздухе; 4) образец находится на подложке, и облучение проводится в вакууме. Следует отметить, что материалы, изложенные в этой главе, могли бы составить содержание отдельной диссертации. В §2.2 исследовано влияние температурной зависимости теплофизических величин и степени черноты подложки на температурное поле диэлектриков в поле непрерывного пучка ионов как в воздухе, так и в вакууме. Оказалось, что учёт температурной зависимости коэффициента теплопроводности подложки существенно влияет на формирование температурного поля в системе образец — подложка при непрерывном облучении пучком ионов как на воздухе, так и в вакууме. Для всех рассмотренных случаев получены аналитические выражения для температурных полей образца и подложки, а также система взаимосвязанных нелинейных алгебраических уравнений для опорных температур. Путём численного решения системы нелинейных алгебраических уравнений установлены нелинейности зависимости температуры облучаемой поверхности системы образец — подложка, а также тыловой стороны этой системы от параметров падающего пучка ионов. В §2.3 исследовано влияние термостатированной подложки на температурное поле диэлектрических пленок и подложки в поле непрерывного пучка ионов, где получены

аналитические выражения для температурного поля диэлектрического образца, прикреплённого к массивной подложке, вторая сторона которой погружена в воду, а облучение проводится в воздухе. Обнаружена нетривиальная зависимость температуры облучённой поверхности образца от параметров потока ионов. В §2.4 теоретически исследовано влияние тепловой нелинейности теплофизических величин, степени черноты и коэффициента теплоотдачи на температурное поле тонких плёнок полиимида в поле непрерывного пучка протонов. Проведено сравнение с экспериментом, и получено удовлетворительное совпадение результатов теории с экспериментальными данными.

**Третья глава** диссертационной работы посвящена созданию теории генерации линейных и нелинейных тепловых волн в диэлектрических плёнках без подложки при облучении гармонически модулированным ионным пучком. Глава состоит из трёх разделов. В §3.1 сформулирована теплофизическая модель задачи, в которой, учитывая малую длину пробега ионов в плёнке  $-R$  по сравнению с её толщиной  $L$ , предложена система нелинейных уравнений теплопроводности для нестационарного температурного поля и набор граничных условий к ним. Возмущение температуры в данном слое представлено в виде суммы локально-равновесной, линейной и нелинейной частей, при этом нелинейная составляющая колебаний выражена как сумма колебаний на основной и второй гармониках. В §3.2 получено решение системы уравнений для линейной составляющей колебания температуры. Из полученного решения следует, что частотная зависимость амплитуды линейной составляющей возбуждаемой тепловой волны в облучаемом слое пропорциональна  $\omega^{-1}$ , в то время как для необлучаемого слоя пропорциональна  $\omega^{-3/2}$ . В §3.3 получено решение системы уравнений для основной гармоники нелинейного колебания температуры, которое описывает все особенности возбуждения основной гармоники нелинейной тепловой волны. Далее рассмотрен случай, когда обе части плёнки выполнены из одного и того же материала, и было установлено, что частотные зависимости амплитуды возбуждаемой основной гармоники нелинейной тепловой волны определяются выражениями

$$\Phi_{1N(1)}(x, \omega) \approx \frac{C_1}{\omega} + \frac{C_2}{\omega^2} + \frac{C_3}{\omega^{5/2}} - \text{ для облучаемого слоя и } \Phi_{1N(2)}(x, \omega) \approx \frac{K_1}{\omega} + \frac{K_2}{\omega^{3/2}} + \frac{K_3}{\omega^2}$$

для второй части, где величины  $C_i$  и  $K_i$  являются константами.

В §3.4 получены общие выражения, описывающие все особенности возбуждения второй гармоники нелинейной тепловой волны. Здесь же рассмотрен случай, когда обе части плёнки состоят из одного материала, и установлено, что частотная зависимость амплитуды возбуждаемой второй гармоники тепловой волны в облучаемой и не облучаемой частях

подчиняется закономерностям  $\Phi_{2N(1)}(x, \omega) \sim \frac{A_1}{\omega^2} + \frac{A_2}{\omega^3}$  и  $\Phi_{2N(2)}(x, \omega) \sim \frac{H_1}{\omega^2} + \frac{H_2}{\omega^3} + \frac{H_3}{\omega^4}$  соответственно. Здесь и коэффициенты, которые зависят от теплофизических параметров обоих слоёв образца и их термических коэффициентов.

**Четвёртая глава** диссертационной работы посвящена созданию теории генерации линейных и нелинейных тепловых волн в диэлектрических плёнках с подложкой при облучении тем же гармонически модулированным ионным пучком. Описанию теплофизической модели задачи посвящён §4.1, где исходной является система из трёх нелинейных уравнений теплопроводности для соответствующих слоёв. Так же, как и в предыдущей главе, здесь получены системы уравнений для локально-равновесной, линейной и нелинейной частей, а также набор граничных условий, необходимых для решения этих систем. Решение линейной задачи получено в §4.2, и установлено, что в облучаемом слое частотная зависимость амплитуды линейной составляющей возбуждаемой тепловой волны пропорциональна  $\omega^{-1}$ , а для двух необлучаемых слоёв пропорциональна  $\omega^{-3/2}$ . В §4.3 получено решение системы уравнений для основной гармоники нелинейного колебания температуры, которое описывает все особенности возбуждения этой гармоники нелинейной тепловой волны. Решение системы уравнений для второй гармоники нелинейного колебания температуры получено в §4.4, и оно описывает все особенности возбуждения второй гармоники нелинейной тепловой волны.

**В заключении** диссертационной работы подытожены основные выводы проведённых исследований. Подчёркиваются ключевые полученные результаты и положения, выносимые на защиту. В частности, отмечается, что получены новые выражения, описывающие особенности формирования температурного поля в плёнках при облучении постоянным потоком ионов, а также особенности генерации линейных и нелинейных тепловых волн в диэлектрических плёнках при облучении гармонически модулированным ионным пучком. Приведённые выводы в разделе "Заключение" корректно сформулированы и в целом отражают полученные результаты и положения, выносимые на защиту.

К диссертации имеются следующие замечания:

1. В третьей и четвёртой главах диссертационной работы проведено относительно мало численных расчётов на основе полученных аналитических выражений.
2. Одними и теми же буквами обозначены теплоёмкости и неопределённые константы (стр.19 автореферата).
3. В работе встречаются орфографические и технические ошибки.

Однако высказанные замечания не изменяют общего положительного впечатления о данной диссертационной работе.

## Заключение

Диссертационная работа «Особенности формирования стационарного поля температуры и генерации тепловых волн в плёнках диэлектриков в поле непрерывного гармонически модулированного пучка ионов» представляет собой законченный научно-исследовательский труд, выполненный на высоком научном уровне. Она содержит новые научно обоснованные результаты, совокупность которых имеет важное значение для развития физики тепловых волн в конденсированных средах. Выводы, приведённые в диссертации, обоснованы и соответствуют её содержанию. Автореферат диссертации оформлен корректно и отражает содержание работы. Материалы диссертации прошли достаточную апробацию на различных международных и республиканских научных конференциях. Практическая значимость полученных результатов не вызывает сомнений. Диссертационная работа «Особенности формирования стационарного поля температуры и генерации тепловых волн в пленках диэлектриков в поле непрерывного гармонически модулированного пучка ионов» по объёму, оформлению, содержанию и значимости полученных результатов отвечает всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а её автор, Абдурахмонов Абдурахмон Абдулкадимович, заслуживает присуждения искомой учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 — физика конденсированного состояния.

Отзыв подготовлен на основе анализа диссертации, автореферата и научных публикаций автора в научных изданиях и принят на основании обсуждения на заседании научного семинара кафедры «Математики и физики», Российско-Таджикского (Славянского) университета (РТСУ) (протокол №6 от 25 февраля 2025 года).

Председатель научного семинара  
естественнонаучного факультета РТСУ,  
кандидат физ.-мат. наук, доцент



Насрулов Х.

Рецензент,  
доктор физ.-мат наук, доцент РТСУ



Кабилев М.М.

Секретарь научного семинара  
кандидат физ.-мат. наук, доцент РТСУ  
Подписи Насрулова Х., Кабилова М.М., Гулбоева Б.Дж  
заверяю.



Гулбоев Б.Дж.

Начальник отдела кадров РТСУ  
Контакты: Российско-Таджикский (Славянский) университет,  
734025, ул. Турсунзода, 30, Душанбе, Таджикистан,  
Телефон: (+992) 37 221-35-50, (+992) 939198960  
E-mail: p.rektora@mail.ru, [maruf1960@mail.ru](mailto:maruf1960@mail.ru), [www.rtsu.tj](http://www.rtsu.tj)



Рахимов А.А.