

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника Отделения физики твердого тела Физического института имени П.Н. Лебедева РАН Клименко Олега Александровича на диссертационную работу ЧУЧУПАЛА Сергея Вячеславовича «Поглощение волн терагерцового диапазона в нелинейно-оптических кристаллах ZnGeP_2 », представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 — радиофизика.

Диссертационная работа Чучупала С.В. посвящена экспериментальному исследованию механизмов поглощения излучения терагерцового (ТГц) диапазона частот в полупроводниковых нелинейно-оптических кристаллах дифосфида цинка-германия ZnGeP_2 . Интерес к кристаллам ZnGeP_2 обусловлен возможностью генерации в них ТГц излучения на разностной частоте при накачке лазерным излучением инфракрасного (ИК) или оптического диапазонов. Помимо выраженных нелинейно-оптических свойств кристаллы ZnGeP_2 обладают также высоким порогом оптического пробоя, хорошей теплопроводностью, механической прочностью и другими характеристиками, делающими данный материал весьма перспективным для создания на его основе источников ТГц излучения. Однако существующий на данный момент дефицит информации о диэлектрических параметрах монокристаллов ZnGeP_2 , определяющих поглощение излучения в ТГц-диапазоне, затрудняет практическое применение данного материала. В связи с этим, **актуальность** тематики диссертации не вызывает сомнений.

В качестве основных экспериментальных методов исследования были выбраны Фурье- и ЛОВ-спектроскопия (ЛОВ – лампа обратной волны). В работе представлены полученные на Фурье-спектрометре «Bruker IFS-113v» спектры отражения и пропускания излучения кристаллом ZnGeP_2 в диапазоне $30 - 5000 \text{ см}^{-1}$ при комнатной температуре, спектры пропускания в диапазоне $40 - 300 \text{ см}^{-1}$ в интервале температур $10 - 300 \text{ К}$ и полученные на оригинальном ЛОВ-спектрометре «Эпсилон» спектры пропускания излучения в диапазоне $5 - 32 \text{ см}^{-1}$ в интервале температур $10 - 300 \text{ К}$. Проведенный в работе анализ экспериментальных данных с использованием различных теоретических моделей взаимодействия фононов и свободных электронов с электромагнитным излучением позволил определить вклады однофононных и многофононных механизмов и влияние электронов проводимости на поглощение ТГц излучения в кристалле ZnGeP_2 . Кроме того, на основе

экспериментальных данных автором были получены частотные зависимости динамической проводимости, действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости, коэффициента поглощения монокристалла ZnGeP_2 в ТГц диапазоне частот.

Интересной и практически значимой особенностью данной работы является исследование влияния облучения кристалла ZnGeP_2 быстрыми электронами на поглощение ТГц излучения, поскольку облучение электронами при определенных параметрах (энергия электронов 4 МэВ, доза $1,8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$) уменьшает поглощение лазерного излучения ИК диапазона и более чем на порядок снижает величину проводимости в кристаллах ZnGeP_2 .

Наиболее **важными новыми результатами**, полученными автором, представляются следующие:

1. Впервые проведено методами ТГц- и ИК-спектроскопии экспериментальное исследование механизмов поглощения электромагнитных волн ТГц диапазона в кристалле ZnGeP_2 . Получены спектры пропускания и отражения монокристалла ZnGeP_2 , необлученного и облучённого электронами с энергией 4 МэВ и дозой $1,8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, в диапазоне частот $5 - 5000 \text{ см}^{-1}$ и в интервале температур $10 - 300 \text{ К}$.
2. В результате анализа экспериментальных данных установлено, что поглощение электромагнитных волн монокристаллом ZnGeP_2 в диапазоне частот $5 - 350 \text{ см}^{-1}$ формируется однофононными и двухфононными разностными процессами. При этом влияние свободных носителей на поглощение излучения в ТГц диапазоне пренебрежимо мало.
3. Обнаружено, что облучение кристалла ZnGeP_2 электронами с энергией 4 МэВ и дозой $1,8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ не оказывает существенного влияния на поглощение кристаллом излучения ТГц диапазона и приводит к уменьшению коэффициента оптического преломления материала в данном диапазоне частот на $\sim 1,6\%$ (диэлектрической проницаемости на $\sim 3\%$).
4. Показано, что эффективное снижение поглощения излучения ТГц диапазона происходит при охлаждении образца до температуры $80 - 100 \text{ К}$. При дальнейшем снижении температуры остаточное поглощение не изменяется.

Практическая значимость диссертационной работы вполне очевидна, поскольку полученные результаты послужат основой для расчёта параметров нелинейно-оптического кристалла ZnGeP_2 , необходимых для создания источников ТГц-излучения.

По диссертации имеются следующие **замечания**:

1. При комплексном анализе полученных на ЛОВ- и Фурье-спектрометрах данных поглощения и пропускания излучения кристаллами ZnGeP_2 автор использует

программную среду WASF, в которой на основе различных теоретических моделей производятся расчеты частотных зависимостей основных величин: пропускания, отражения, мнимой и действительной частей диэлектрической проницаемости, поглощения, динамической проводимости. При этом из текста не понятно, как определяются число и параметры модельных осцилляторов (частота, поглощение, диэлектрический вклад), играющие ключевую роль при расчетах.

2. В разделе 2.6, анализируя результатов измерений на ЛОВ-спектрометре при различных температурах образца, автор объясняет частотный сдвиг интерференционной картины в спектре пропускания (рисунок 32) изменением диэлектрической проницаемости кристалла. Хотя подобный сдвиг может быть связан с изменением линейных размеров образца вследствие охлаждения, в диссертационной работе это не обсуждается.
3. Для определения суммарного диэлектрического вклада фоонных резонансов автор анализирует изменение с температурой интерференционной картины в спектре пропускания в области низких частот ($5 - 30 \text{ см}^{-1}$), поскольку частоты всех резонансов находятся выше этой области. Подобная интерференционная картина в спектрах пропускания наблюдается и в более высокочастотных областях (например, $150 - 180 \text{ см}^{-1}$). Было бы интересно провести аналогичный анализ в этих областях и сопоставить его результаты с данными таблиц 1 и 2, поскольку некоторые из фоонных резонансов, перечисленных в таблицах 1 и 2, находятся ниже по частоте и не дают вклада в высокочастотную диэлектрическую проницаемость.
4. Несмотря на значительный объем данных Фурье-спектроскопии, в работе не приводится ни одной интерферограммы Фурье, являющейся первичным результатом измерений по отношению к спектрам.
5. Отсутствуют данные по разрешению ЛОВ- и Фурье-спектрометров.

Сделанные замечания не снижают высокой оценки представленной диссертации и полученных в ней результатов. Научные положения, выносимые на защиту, являются **новыми** и **оригинальными**, а все основные выводы **обоснованными** и **достоверными**. Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием достаточно совершенных современных экспериментальных методик, тщательным анализом полученных результатов и сопоставлением с известными литературными данными. В целом, представленная к защите диссертация выполнена на высоком научном уровне. Изложенные в ней результаты прошли апробацию на 6 всероссийских и международных конференциях. Основные результаты опубликованы в 4 статьях в рецензируемых научных журналах, реко-

мендованных ВАК РФ. Автореферат и публикации достаточно полно и правильно отражают содержание диссертации.

Диссертация Чучупала Сергея Вячеславовича «Поглощение волн терагерцового диапазона в нелинейно-оптических кристаллах ZnGeP_2 » представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне. По своей актуальности, новизне, объёму выполненных исследований и ценности полученных результатов диссертационная работа отвечает всем требованиям, установленным в п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённом постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013, предъявляемым к диссертационным работам на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук. Считаю, что Чучупал Сергей Вячеславович заслуживает присуждения искомой учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 — радиофизика.

Старший научный сотрудник
Отделения физики твёрдого тела
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Физический институт имени П.Н. Лебедева
Российской академии наук,
кандидат физико-математических наук

Клименко Олег Александрович

119991, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 53

Телефон: +7 (499) 132-67-44

E-mail: oleg.klimenko@mail.ru

Подпись Клименко О.А. заверяю.

Секретарь Учёного совета ФИАН

кандидат физико-математических наук



Цвентух Михаил Михайлович

14.07.2016