

На правах рукописи



Царев Максим Владимирович

**ГЕНЕРАЦИЯ ОБЪЕМНЫХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ
ТЕРАГЕРЦОВЫХ ВОЛН ДВИЖУЩИМИСЯ
НЕЛИНЕЙНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ**

01.04.21 – лазерная физика

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2009

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении
высшего профессионального образования
“Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского”

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
профессор М.И. Бакунов

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
профессор В.Б. Гильденбург
ННГУ, Нижний Новгород
кандидат физико-математических наук
А.Г. Степанов
Институт спектроскопии РАН, Троицк

Ведущая организация: Международный лазерный центр МГУ, Москва

Защита состоится “ _____ ” _____ 2009 г. в _____ часов
на заседании диссертационного совета Д 212.166.07 при Нижегородском госу-
дарственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, Нижний
Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 1, ауд. 420.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижего-
родского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

Автореферат разослан “ _____ ” _____ 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н., доцент



В.В. Черепенников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы

Освоение терагерцового диапазона электромагнитных волн – одно из наиболее быстро развивающихся направлений современной прикладной физики. Интерес к данному диапазону связан с перспективами широкого применения терагерцового излучения в фундаментальных исследованиях и практических приложениях. В терагерцовом диапазоне лежат спектры многих важных органических молекул, включая белки и ДНК, а также фоновые резонансы кристаллических решеток, что позволяет развивать новые методы спектроскопии биологических и полупроводниковых образцов (Smye S.W. et al., *Phys. Med. Biol.* **46**, R101 (2001), Hattori T. et al., *Sci. Technol. Adv. Mater.* **6**, 649 (2005)) и даже одиночных молекул (Gelfand R. M. et al., *Opt. Lett.* **34**, 1087 (2009)). С помощью терагерцового излучения можно управлять химическими реакциями (Dudovich N. et al., *Nature* **418**, 512 (2002)) и манипулировать электронными состояниями в квантовых ямах (Danielson J.R. et al., *Phys. Rev. Lett.* **99**, 237401 (2007)). В отличие от рентгена, терагерцовое излучение позволяет проводить безвредную для человека диагностику, в том числе раковых опухолей, глубины и степени ожогов (Oh S.J. et al., *Opt. Express* **17**, 3469 (2009)). Перспективны применения терагерцового излучения для создания высокоскоростных беспроводных сетей внутри зданий, систем безопасности на основе терагерцового видения (Chan W. L. et al., *Rep. Prog. Phys.* **70**, 1325 (2007)), поиска взрывчатых веществ по их спектральным «отпечаткам пальцев», систем контроля качества продуктов питания (Ung B.S.-Y. et al., *SPIE Conf. Series* **6799** (Dec. 2007)) и др. Многообещающими методами терагерцовых исследований являются микроскопия с субволновым разрешением и локальная спектроскопия (Lecaque R. et al., *Opt. Express* **16**, 4731 (2008)).

Наиболее сложной проблемой в освоении терагерцового диапазона является создание достаточно интенсивных и компактных источников когерентного терагерцового излучения. Существующие в настоящее время мощные терагерцовые генераторы – лазеры на свободных электронах и синхротроны – дороги, громоздки и не могут иметь широкого применения. Среди компактных источников перспективны квантово-каскадные лазеры, однако они не способны генерировать частоты ниже 10 ТГц без охлаждения до криогенных температур (Scalari et al., *Appl. Phys. Lett.* **94**, 041114 (2009)). С помощью электронных приборов (ламп обратной волны и гиротронов с импульсным магнитным полем) удается генерировать частоты не выше 1 ТГц.

Наиболее распространенные в настоящее время методы «настошной» (table-top) генерации терагерцового излучения основаны на воздействии фемтосекундными оптическими импульсами на электрооптические, полупроводниковые и газовые среды. Источником терагерцового излучения при этом являются наводимые в веществе всплески нелинейной поляризации или тока проводимости субпикосекундной длительности. Генерируемое излучение представляет со-

бой короткие (длительностью в 1-1,5 периода колебаний) терагерцовые импульсы с широким – простирающимся от долей до нескольких терагерц – спектром, что позволяет проводить с их помощью широкополосную спектроскопию. Один из наиболее распространенных методов оптико-терагерцовой конверсии – оптическое выпрямление фемтосекундных лазерных импульсов в электрооптических кристаллах (Hu В.В. et al., *Appl. Phys. Lett.* **56**, 506 (1990)). В этом методе распространяющийся в кристалле оптический импульс накачки индуцирует нелинейную поляризацию, которая повторяет форму огибающей оптической интенсивности. Нелинейная поляризация движется с групповой скоростью оптического импульса и излучает терагерцовые волны. Именно механизм оптического выпрямления и использован в качестве основы для рассматриваемых в диссертации схем оптико-терагерцовой конверсии.

С кинематической точки зрения выделяют два режима оптического выпрямления в зависимости от дисперсионных свойств электрооптического материала – сверхсветовой, при $n_g < n_0$, и досветовой, при $n_g > n_0$, режимы, где n_g – оптический индекс группового запаздывания, а n_0 – низкочастотный (при стремящейся к нулю частоте) показатель преломления (Stevens Т. Е. et al., *Science* **291**, 627 (2001)). В сверхсветовом режиме ($n_g < n_0$) оптический импульс может генерировать терагерцовое излучение за счет эффекта Черенкова (Аскарьян Г. А., *ЖЭТФ* **42**, 1360 (1962)). В досветовом режиме ($n_g > n_0$) из-за наличия дисперсии всегда находится частота ω_0 , на которой выполняется условие синхронизма между лазерным импульсом и попутно распространяющейся терагерцовой волной: $n_g = n(\omega_0)$, где $n(\omega)$ – терагерцовый показатель преломления. Так, например, синхронизованное возбуждение 2,5 ТГц волны импульсом титан-сапфирового лазера в кристалле ZnTe является широко распространенным методом терагерцовой генерации.

В недавней работе Vakunov et al., *Phys. Rev. B* **76**, 085346 (2007) было предложено выделять два случая в сверхсветовом режиме оптико-терагерцовой конверсии – *сильно сверхсветовой*, в котором дисперсия терагерцовых волн не существенна, и *слабо сверхсветовой*, в котором дисперсия играет важную роль. В диссертации показано, что досветовой режим оптико-терагерцовой конверсии также полезно разделять на два случая – *слабо* и *сильно досветовой* режимы – согласно условиям $\omega_0\tau \leq 2$ и $\omega_0\tau \gg 2$ соответственно (τ – длительность лазерного импульса). Данные условия определяют эффективность синхронизованного возбуждения попутной терагерцовой волны. К слабо досветовому режиму относится, например, упомянутая выше конверсия импульсов титан-сапфирового лазера в кристалле ZnTe. Впервые введенный в диссертации сильно досветовой режим может быть реализован, например, при конверсии импульсов титан-сапфирового лазера с длительностью >70 фс в кристалле GaP. Как показано в диссертации, генерация терагерцового излучения в этом режиме происходит не за счет механизмов синхронизованного возбуждения или черенковского излучения, а в результате переходных процессов на границах кристалла. В связи с этим сильно досветовой режим может обеспечить генерацию привлекательных для спектроскопии терагерцовых импульсов с одним периодом колебаний поля и реализацию предельно малых (квазиточечных) терагерцовых источников, необ-

ходимых для повышения разрешающей способности ближнепольной терагерцовой микроскопии.

Актуальной задачей является повышение эффективности оптико-терагерцовой конверсии. Рекордные на сегодня значения эффективности ($\sim 10^{-3}$) достигнуты при конверсии лазерных импульсов со скошенным (по отношению к фазовым фронтам) фронтом интенсивности в «сверхсветовых» материалах (Stepanov A.G. et al., *Opt. Lett.* **33**, 2497 (2008)). В этом методе синхронизм достигается с терагерцовой волной, распространяющейся в направлении нормали к фронту интенсивности лазерного импульса. Несмотря на успехи, достигнутые с помощью данного метода, его теоретическому изучению была посвящена фактически единственная работа Шуваев А.В. и др., *Изв. вузов: Радиофизика* **50**, 1020 (2008), в которой, к тому же, не учитывались такие важные факторы, как дисперсия и поглощение терагерцовых волн и влияние выходной границы кристалла. В диссертации разработана последовательная электродинамическая теория генерации терагерцовых волн лазерными импульсами со скошенным фронтом интенсивности в электрооптических кристаллах, которая учитывает все существенные факторы – дисперсию и поглощение терагерцовых волн, конечность поперечного размера импульса накачки, влияние выходной границы кристалла. На основе развитой теории проведен анализ двух типичных экспериментальных ситуаций – конверсии импульсов титан-сапфирового лазера в кристалле LiNbO_3 при комнатной и криогенной температурах.

Применяемые в настоящее время методы оптико-терагерцовой конверсии направлены, как правило, на генерацию объемных терагерцовых волн, распространяющихся от области конверсии в виде свободного излучения. Терагерцовая спектроскопия с использованием объемных волн требует достаточно большого количества исследуемого вещества (Nagel M. et al., *Appl Phys. Lett.* **80**, 154 (2002)). Между тем, на практике часто возникает необходимость исследования тонких (в масштабе длины терагерцовой волны) пленок и сверхмалых количеств веществ, например, биологических образцов (ДНК, протеинов и т.п.). При этом для обеспечения необходимой чувствительности спектроскопической схемы требуется концентрация терагерцового поля в области с микронными и даже субмикронными размерами. Одним из способов достижения высокой локализации терагерцового поля является использование терагерцовых поверхностных плазмонов (ПП), направляемых поверхностью легированного полупроводника (Bakunov M.I. et al., *Opt. Photon. News* **16**, 29 (2005)). Причем благодаря нелинейности полупроводника конверсия лазерных импульсов в терагерцовые ПП может осуществляться непосредственно на поверхности полупроводника (Bakunov M.I. et al., *Phys. Rev. B* **72**, 195336 (2005)), что позволяет избежать потерь ввода терагерцового излучения в волноведущую структуру. Недостатком терагерцовых ПП на поверхности полупроводника является их небольшая (< 1 см) длина распространения, ограниченная омическими потерями в полупроводнике. В последнее время выяснилось, что сильно локализованные терагерцовые ПП с малым поглощением могут направляться микроструктурированными (со структурой типа гребенки или решетки отверстий) металлическими поверхностями (Pendry J.V. et al., *Science* **305**, 847 (2004)). Однако, в связи со слабой нелинейностью металлов,

упомянутый выше метод прямого оптического возбуждения терагерцовых ПП является неэффективным на металлических поверхностях. В диссертации предложена и исследована схема эффективного возбуждения терагерцовых ПП на структурированной поверхности металла путем сканирования ультракороткими лазерными импульсами нанесенной на поверхность полоски электрооптического материала.

Развитые в работах Vakunov M.I. et al., *Phys. Rev. B* **72**, 195336 (2005); *J. Appl. Phys.* **98**, 033101 (2005) стационарные теории возбуждения терагерцовых ПП на поверхности легированных полупроводников движущимися светоиндуцированными источниками ограничиваются рассмотрением идеализированного случая равномерного движения источника по поверхности. Между тем, на практике из-за ограниченной апертуры лазерного пучка источник пробегает по поверхности конечную дистанцию, что придает нестационарный характер процессу оптико-терагерцовой конверсии. В диссертации исследованы особенности возбуждения терагерцовых ПП светоиндуцированным источником, пробегающим с досветовой скоростью конечную дистанцию по поверхности легированного полупроводника. Показано, что переходные процессы в начале и в конце дистанции могут оказывать существенное влияние на амплитуды и частотный спектр возбуждаемых терагерцовых полей, а также на эффективность конверсии. Введена длина формирования ПП и найдены условия применимости результатов предшествующих стационарных расчетов (Vakunov M.I. et al., *J. Appl. Phys.* **98**, 033101 (2005)).

Цель диссертации

Целью диссертации является разработка методов эффективной генерации объёмных и поверхностных терагерцовых волн при воздействии ультракороткими лазерными импульсами высокой интенсивности на электрооптические материалы.

Научная новизна

Научная новизна работы состоит в следующем.

1. Впервые введен и исследован новый, «сильно досветовой», режим генерации терагерцовых волн при выпрямлении ультракоротких лазерных импульсов в электрооптических кристаллах. Показана перспективность данного режима для повышения разрешающей способности ближнепольной терагерцовой микроскопии.
2. Впервые найдены фундаментальные ограничения на минимальный – при неограниченно острой фокусировке лазерного импульса накачки – поперечный размер области терагерцовой эмиссии из электрооптического кристалла.
3. Впервые разработана последовательная электродинамическая теория терагерцовой генерации при оптическом выпрямлении ультракоротких лазерных импульсов со скошенным фронтом интенсивности в электрооптических кристаллах, которая учитывает все существенные факторы, влияющие на эффективность конверсии – ограниченность поперечного размера лазерного импульса, дисперсию и поглощение терагерцовых волн, влияние выходной гра-

ницы кристалла. Раскрыта структура генерируемых терагерцовых полей. Обобщены формулы Френеля на случай наклонного падения вынужденных терагерцовых волн на границу кристалла. Показано, что механизмы черенковского и переходного излучений могут доминировать над генерацией синхронизированной волны.

4. Впервые предложен и исследован метод прямой конверсии ультракоротких лазерных импульсов в терагерцовые поверхностные плазмоны, направляемые микроструктурированной (со структурой типа гребенки или решетки отверстий) поверхностью металла.
5. Впервые исследована роль нестационарных эффектов при возбуждении терагерцовых поверхностных плазмонов на поверхности легированного полупроводника нелинейным светоиндуцированным источником, проходящим конечную дистанцию по поверхности. Введена длина формирования поверхностного плазмона и найдены условия применимости результатов предшествующих стационарных расчетов.

Практическая значимость работы

Введенный и исследованный в диссертации «сильно досветовой» режим генерации терагерцового излучения ультракороткими лазерными импульсами в электрооптических кристаллах может быть использован для целей широкополосной терагерцовой спектроскопии с разрешением по времени, а также для увеличения разрешающей способности безапертурной ближнепольной терагерцовой микроскопии.

На основе построенной в диссертации теории генерации терагерцового излучения ультракороткими лазерными импульсами со скошенным фронтом интенсивности даны конкретные рекомендации по оптимизации параметров импульса накачки и размеров кристалла, которые могут быть использованы в экспериментах для повышения эффективности оптико-терагерцовой конверсии.

Предложенный в работе метод прямой конверсии ультракоротких лазерных импульсов в терагерцовые поверхностные плазмоны, направляемые микроструктурированной (со структурой типа гребенки или решетки отверстий) поверхностью металла, может быть использован для разработки (био)сенсоров и развития методов поверхностной терагерцовой спектроскопии тонких пленок и малых количеств вещества.

Основные положения, выносимые на защиту

1. В «досветовых» электрооптических кристаллах, где групповая скорость оптического импульса накачки не превышает максимальную фазовую скорость терагерцовых волн, может иметь место особый – «сильно досветовой» – режим оптико-терагерцовой конверсии, в котором не эффективны механизмы синхронизированного возбуждения и черенковского излучения терагерцовых волн. В этом режиме терагерцовая генерация обеспечивается трансформацией на границах кристалла ближнего терагерцового поля выпрямленного оптического импульса. Условием реализации «сильно досветового» режима является узость спектральной полосы фемтосекундного оптического импульса

по сравнению с частотой, на которой достигается синхронизм между оптическим импульсом и попутной терагерцовой волной. Данное условие выполняется, например, для импульсов титан-сапфирового лазера типичной длительности (более 70 фс) в кристалле GaP. «Сильно досветовой» режим конверсии может обеспечить генерацию терагерцовых импульсов с одним периодом колебаний поля, удобных для использования в широкополосной спектроскопии во временной области, а также реализацию точечного терагерцового источника, необходимого для повышения разрешающей способности ближнепольной терагерцовой микроскопии.

2. Существует фундаментальное ограничение на минимальный – при неограниченно острой фокусировке оптического импульса накачки – размер области на выходной грани электрооптического кристалла, из которой происходит эмиссия терагерцовых волн. Этот минимальный размер определяется двумя факторами: ограничением снизу на поперечный размер ближнего терагерцового поля нелинейного источника в кристалле и уширением поперечного распределения терагерцового поля в результате прохождения поля через выходную границу кристалла. Для нитевидного импульса накачки минимальный размер поперечного распределения интенсивности ближнего терагерцового поля в кристалле (в пренебрежении терагерцовой дисперсией) определяется формулой $0,25 \tau_{\text{FWHM}} = (n_g^2 - n_0^2)^{1/2}$, где τ_{FWHM} – длительность импульса накачки, n_g – оптический индекс группового запаздывания, а n_0 – терагерцовый показатель преломления. Например, при возбуждении кристалла GaP импульсами титан-сапфирового лазера с $\tau_{\text{FWHM}} = 150$ фс минимальный размер составляет 9 мкм. В результате прохождения через границу поперечное распределение терагерцовой интенсивности уширяется до 16 мкм.
3. При оптическом выпрямлении в электрооптическом кристалле фемтосекундного лазерного импульса со скошенным (по отношению к фазовым фронтам) фронтом интенсивности генерируемое терагерцовое поле является суперпозицией трёх составляющих: ближнего поля нелинейного источника, синхронизованной квазиплоской волны и сильно асимметричного черенковского конуса. В зависимости от температуры кристалла и степени фокусировки лазерного импульса доминирующий вклад в терагерцовую эмиссию из кристалла могут давать различные составляющие поля. Например, при выпрямлении импульсов титан-сапфирового лазера в кристалле LiNbO₃ генерация синхронизованной волны вносит определяющий вклад только в условиях охлаждения кристалла до криогенных температур, тогда как при комнатной температуре доминирует вклад черенковского конуса и ближнего поля.
4. Терагерцовые поверхностные плазмоны на микроструктурированной (со структурой типа гребёнки или решётки отверстий) поверхности металла могут эффективно генерироваться при сканировании сфокусированным в линию фемтосекундным лазерным импульсом нанесённой на поверхность полоски электрооптического материала. Источником терагерцовых волн является нелинейная поляризация, наводимая лазерным импульсом в полоске в результате его оптического выпрямления. Нелинейная поляризация движется вдоль полоски со сверхсветовой скоростью и возбуждает черенковский конус

терагерцовых плазмонов на поверхности. В частности, при сканировании импульсом титан-сапфирового лазера полоски GaAs, нанесённой на гребёнчатую поверхность идеального проводника, эффективность конверсии в поверхностные плазмоны может быть на порядок выше, чем на гладкой поверхности GaAs. При этом генерируется широкий (до двух октав) спектр поверхностных плазмонов, локализованных в тонком (с толщиной менее половины длины терагерцовой волны) слое вблизи поверхности проводника. Прямое оптическое возбуждение терагерцовых поверхностных плазмонов на структурированной поверхности металла перспективно для развития методов поверхностной терагерцовой спектроскопии.

5. При генерации терагерцовых поверхностных плазмонов нелинейным источником, проходящим конечную дистанцию по волноведущей поверхности, существенную роль могут играть переходные процессы, связанные с моментами старта и остановки источника. В частности, при синхронизованном возбуждении терагерцового плазмона на поверхности легированного полупроводника нитевидным источником, движущимся по поверхности с досветовой скоростью (в перпендикулярном к нити направлении), стационарное решение для генерируемых терагерцовых полей оказывается справедливым только при дистанциях пробега источника, превышающих длину формирования поверхностного плазмона (или длину поглощения, если последняя меньше длины формирования). При меньших дистанциях необходимо нестационарное рассмотрение. Длина формирования поверхностного плазмона равна минимальной длине когерентности в интервале генерируемых терагерцовых частот и может составлять несколько сантиметров. Например, для 3 ТГц плазмона на поверхности легированного GaAs с плазменной частотой 8 ТГц длина формирования составляет $\sim 1,7$ см, а длина поглощения ~ 2 см.

Апробация результатов и публикации

По теме диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, и 8 работ в трудах конференций.

Основные результаты докладывались на 33-ей международной конференции по инфракрасному излучению и миллиметровым волнам (Пасадена, Калифорния, США, 2008), международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики-2008» (Санкт-Петербург, 2008), 2-ом международном конгрессе по искусственным материалам для оптического и СВЧ излучения (Памплона, Испания, 2008), международной конференции по лазерам, электрооптике и квантовой электронике (Мюнхен, Германия, 2006), международной рабочей группе по плазмонике и приложениям в нанотехнологиях (Сингапур, 2006), 3-ей международной конференции по оптике лазеров для молодых учёных (Санкт-Петербург, 2006), 2-ой конференции молодых учёных по метаматериалам (Барселона, Испания, 2008), 10-й всероссийской школе-семинаре «Волновые явления в неоднородных средах» (Звенигород, 2006), а также на 10 и 11 Научных конференциях по радиофизике (Нижний Новгород, 2006, 2007), 11-й, 12-й и 13-й Нижегородских сессиях молодых ученых (Нижний Новгород, 2006, 2007, 2008), конферен-

ции молодых учёных «Фундаментальные и прикладные задачи нелинейной физики-2008» (Нижний Новгород), семинарах в Институте прикладной физики РАН.

Личный вклад автора

Автором были самостоятельно выполнены аналитические выкладки, поставлены и проведены эксперименты, а также сделана обработка экспериментальных данных. Численные расчёты проводились совместно с к.ф.-м.н. Бодровым С.Б. Постановка задач и анализ полученных результатов проводились совместно с научным руководителем Бакуновым М.И.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы и списка работ по диссертации. Общий объем диссертации составляет 127 страниц, включая 37 рисунков на 24 страницах, список литературы из 122 наименований на 11 страницах, список работ по диссертации из 11 наименований на 2 страницах.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируются её цели, кратко излагается содержание диссертации, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе предсказан и исследован «сильно досветовой» режим оптико-терагерцовой конверсии ультракоротких лазерных импульсов в электрооптических кристаллах.

В п. 1.1 обсуждаются условия реализации сильно досветового режима.

В п. 1.2 описана теоретическая модель нелинейного источника, индуцируемого лазерным импульсом в кристалле, и приводятся основные уравнения.

В п. 1.3 описана генерация терагерцовых волн в сильно досветовом режиме в приближении планарного оптического импульса. На примере конверсии импульсов титан-сапфирового лазера в кристалле GaP исследована динамика возбуждения терагерцового поля, описаны особенности структуры поля (вид вынужденного и свободного решений уравнений Максвелла с нелинейным источником) и его спектрального состава. Показано, что вынужденный и свободный терагерцовые импульсы обладают двойной инверсией (по порядку следования и полярности) по сравнению с сильно сверхсветовым режимом. Исследовано прохождение терагерцового поля через выходную границу кристалла.

В п. 1.4 исследована генерация терагерцовых волн в кристалле GaP сфокусированным в линию импульсом титан-сапфирового лазера. Изучены картины поля излучения при сильной и слабой фокусировке. Проведено сравнение спектрально-координатных распределений терагерцового флюенса (энергии, излученной с единицы площади выходной грани кристалла) для сильно досветового (в кристалле GaP) и слабо досветового (в кристалле ZnTe) режимов конверсии

импульсов титан-сапфирового лазера. Показано, что использование сильно до-светового режима может обеспечить повышение разрешающей способности ближнепольной терагерцовой микроскопии.

В п. 1.5 исследована зависимость продольного и поперечного масштабов локализации ближнего терагерцового поля нелинейного источника от степени фокусировки и длительности импульса накачки. Получено аналитическое выражение для ближнего поля в пределе неограниченно острой фокусировки. Найдены фундаментальные ограничения на поперечный размер ближнего поля в кристалле. Исследовано уширение поперечного распределения терагерцовой интенсивности при прохождении через выходную границу кристалла.

В п. 1.6 проведено экспериментальное измерение ширины области терагерцовой эмиссии из кристалла GaP при накачке импульсами титан-сапфирового лазера. Продемонстрировано соответствие результатов эксперимента построенной в пп. 1.1 – 1.5 теории.

В п. 1.7 сделаны выводы по первой главе.

Во второй главе разработана теория генерации терагерцового излучения лазерными импульсами со скошенным фронтом интенсивности в электрооптических кристаллах.

В п. 2.1 качественно описываются динамические стадии терагерцовой генерации в электрооптическом кристалле: переходные процессы при входе лазерного импульса в кристалл, стационарный режим генерации при распространении импульса в объеме кристалла и излучение терагерцовых волн из кристалла в вакуум.

В п. 2.2 исследован стационарный режим генерации в объеме электрооптического кристалла. Описана модель нелинейного источника и приведены основные уравнения (п. 2.2.1). Получено решение уравнений Максвелла с нелинейным источником методом преобразования Фурье (п. 2.2.2). В п. 2.2.3 исследована структура решения в пределе планарного импульса накачки. В п. 2.2.4 описана структура терагерцовых полей, возбуждаемых сфокусированным в линию лазерным импульсом (рис. 1).

Представлены результаты численных расчетов для типичных экспериментальных ситуаций – возбуждение импульсами титан-сапфирового лазера кристалла LiNbO_3 при криогенной (10 K) и комнатной (300 K) температурах.

В п. 2.3 рассмотрено излучение терагерцовых волн с выходной грани кристалла. Проведено обобщение формул Френеля для вынужденных полей в случаях планарного (п. 2.3.1) и сфокусированного (п. 2.3.2) лазерного импульса.

В п. 2.4 исследованы спектрально-координатные распреде-

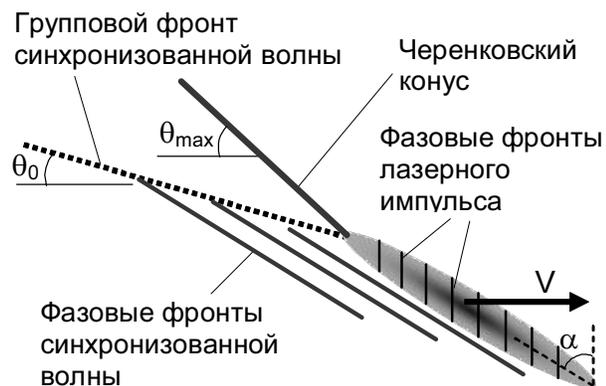


Рис. 1. Структура терагерцовых полей, возбуждаемых лазерным импульсом со скошенным (под углом α к фазовым фронтам) фронтом интенсивности в электрооптическом кристалле.

ления излучаемой из кристалла LiNbO_3 терагерцовой энергии в зависимости от параметров импульса титан-сапфирового лазера накачки и температуры кристалла. Проводится сравнение полученных результатов с теоретическими и экспериментальными результатами других авторов.

В заключительном п. 2.5 даны рекомендации по дальнейшему повышению эффективности терагерцовой генерации лазерными импульсами со скошенным фронтом интенсивности и сформулированы выводы ко второй главе.

В третьей главе предложен метод прямой оптической генерации терагерцовых поверхностных плазмонов (ПП) на микроструктурированной поверхности металла. В этом методе источником поверхностных плазмонов является движущаяся со сверхсветовой скоростью область нелинейной поляризации, наводимая сфокусированным в линию лазерным импульсом в нанесенной на поверхность полоске электрооптического материала (рис. 2). Конкретные расчеты приведены для гребенчатой поверхности идеального проводника при ориентации полоски перпендикулярно гребням структуры.

В п. 3.1 дано описание схемы оптико-терагерцовой конверсии и модели наводимого лазерным импульсом движущегося источника.

В п. 3.2 проведен анализ кинематических характеристик возбуждаемых терагерцовых ПП. Получена связь направления распространения парциального поверхностного плазмона (угла φ) с его частотой. Показано, что направления распространения заключены в секторе, границы которого определяются углом падения лазерного импульса α . Получены выражения для полей терагерцовых ПП, методом стационарной фазы исследованы поля в дальней зоне. Сделаны расчеты для случая возбуждения полоски GaAs импульсами титан-сапфирового лазера.

В п. 3.3 проведено исследование спектрального распределения энергии поверхностных плазмонов и эффективности оптико-терагерцовой конверсии в зависимости от параметров гребенчатой структуры (глубины канавки h и отношения a/d , рис. 2), а также от скорости нелинейного источника V (угла падения α). Найдены оптимальные значения параметров, обеспечивающие максимальную эффективность конверсии. Показано, что локализация генерируемых поверхностных плазмонов может составлять менее половины длины волны.

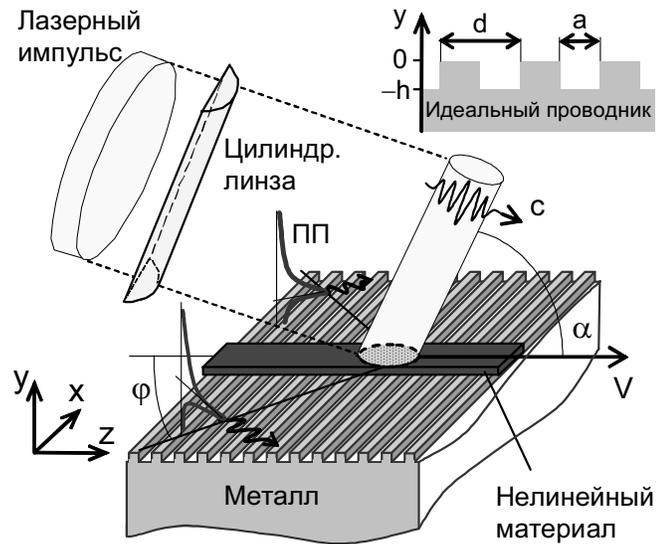


Рис. 2. Схема конверсии ультракоротких лазерных импульсов в терагерцовые поверхностные плазмоны на микроструктурированной поверхности металла. Вставка: геометрия гребенчатой структуры.

В п. 3.4 приведены заключительные замечания по третьей главе.

Четвёртая глава посвящена исследованию переходных эффектов при генерации терагерцовых поверхностных плазмонов на поверхности легированного полупроводника нелинейным светоиндуцированным источником, пробегающим с досветовой скоростью конечную дистанцию вдоль поверхности.

В п. 4.1 вводится модель нелинейного источника, индуцируемого на поверхности полупроводника лазерным импульсом со скошенным фронтом интенсивности и конечной апертурой. Приведены уравнения для терагерцовых полей с нелинейным источником.

В п. 4.2 получено решение уравнений в Фурье-представлении. С помощью методов контурного интегрирования в комплексной плоскости проведено разделение полного решения на свободное излучение (объемные волны), ближнее поле нелинейного источника и поверхностные волны. Последние представлены в виде суперпозиции свободного и вынужденного решений.

В п. 4.3 рассмотрен случай, когда нелинейный источник пробегает полубесконечную дистанцию вдоль поверхности. Введены две стадии в динамике возбуждения ПП нелинейным источником: стадия нарастания амплитуды волнового пакета ПП и стадия увеличения его длительности. Введена длина формирования ПП, на которой происходит переход от первой стадии ко второй. Длина формирования равна минимальной длине когерентности на спектре генерируемых ПП. Показано, что стационарные расчеты предыдущих работ применимы только при дистанциях пробега источника, превышающих длину формирования ПП (или длину поглощения ПП, если последняя меньше длины формирования ПП). Проведены расчеты полей ПП, длины формирования и длины поглощения ПП для случая возбуждения GaAs с плазменной частотой $\omega_p/(2\pi) = 8$ ТГц импульсами титан-сапфирового лазера.

В п. 4.4 рассчитаны терагерцовые поля при конечной дистанции пробега источника по поверхности GaAs ($\omega_p/(2\pi)=8$ ТГц). Исследована эффективность конверсии импульсов титан-сапфирового лазера в 3 ТГц плазмон в зависимости от дистанции пробега источника (ширины лазерного пучка). Показано, что стационарное значение эффективности конверсии достигается при дистанции пробега, превышающей длину формирования ПП.

В п. 4.5 сделаны выводы по четвёртой главе.

В заключении кратко сформулированы основные результаты диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Предсказан и исследован новый – «сильно досветовой» – режим генерации терагерцового излучения ультракороткими лазерными импульсами в электрооптических кристаллах. В этом режиме оказываются неэффективными обычно используемые черенковский и фазосинхронизованный механизмы оптико-терагерцовой конверсии, и терагерцовая эмиссия происходит в результате переходных процессов на границах кристалла. Показано, что данный режим может быть, в частности, реализован при оптическом выпрямлении

импульсов титан-сапфирового лазера в кристалле GaP. В случае планарного импульса накачки обнаружен эффект двойной инверсии (по порядку следования и полярности) генерируемых в GaP терагерцовых импульсов по сравнению, например, с генерацией в кристаллах LiNbO₃ или GaAs. Для сфокусированного в линию импульса накачки рассчитано спектрально-координатное распределение терагерцового флюенса с выходной грани кристалла GaP и показано, что использование «сильно досветового» режима позволяет значительно уменьшить размер области терагерцовой эмиссии с выходной грани кристалла, что необходимо для повышения разрешающей способности ближнепольной терагерцовой микроскопии. Полученные теоретические результаты подтверждены экспериментально.

2. Установлено фундаментальное ограничение на минимальный – при неограниченно острой фокусировке оптического импульса накачки – размер терагерцового пятна на выходной грани электрооптического кристалла. Минимальный размер пятна определяется, во-первых, ограничением снизу на поперечный размер ближнего терагерцового поля нелинейного источника в кристалле, и, во-вторых, уширением поперечного распределения терагерцового поля в результате прохождения поля через выходную границу кристалла. Получено выражение для ближнего поля нелинейного источника в пределе неограниченно острой фокусировки импульса накачки и исследована зависимость поперечного размера поля от длительности импульса накачки и параметров кристалла. Показано, что в условиях «сильно досветового» режима оптико-терагерцовой конверсии импульсов титан-сапфирового лазера типичной длительности (150 фс) в кристалле GaP минимальный размер терагерцового пятна составляет около 16 микрон.
3. Разработана теория генерации терагерцового излучения при оптическом выпрямлении ультракоротких лазерных импульсов со скошенным (по отношению к фазовым фронтам) фронтом интенсивности в электрооптических кристаллах. Теория учитывает все существенные факторы, влияющие на эффективность конверсии – ограниченность поперечного размера лазерного импульса, дисперсию и поглощение терагерцовых волн, влияние выходной грани кристалла. Рассмотрение проведено для практически важной геометрии, когда импульс накачки сфокусирован в линию. На основе разработанной теории проанализированы две типичные экспериментальные ситуации – конверсия импульсов титан-сапфирового лазера в кристалле LiNbO₃ при комнатной и криогенной температурах. Показано, что в зависимости от температуры доминирующим механизмом терагерцовой генерации может быть либо синхронизованная генерация, либо черенковский и переходный механизмы излучения. Найдены значения параметров импульса накачки и размер кристалла, максимизирующие выход терагерцовой энергии.
4. Предложен метод нелинейной конверсии ультракоротких лазерных импульсов в терагерцовые поверхностные плазмоны, направляемые микроструктурированной (со структурой типа гребенки или решетки отверстий) поверхностью металла. Источником терагерцовых волн в этом методе является движущаяся вдоль поверхности со сверхсветовой скоростью нелинейная поляри-

зация, наводимая лазерным импульсом в нанесенной на поверхность полоске нелинейного материала. Для создания такого сверхсветового источника предлагается фокусировать широкий лазерный пучок цилиндрической линзой в линию, наклонно освещающую полоску нелинейного материала. Рассчитаны поля терагерцовых поверхностных плазмонов, генерируемых на гребенчатой поверхности идеального проводника при оптическом выпрямлении импульса титан-сапфирового лазера в нанесенной на поверхность полоске GaAs. Исследовано спектральное распределение энергии генерируемых поверхностных плазмонов и эффективность конверсии в зависимости от параметров гребенчатой структуры и скорости нелинейного источника. Показано, что эффективность конверсии в рассматриваемой схеме может быть на порядок выше, чем при возбуждении поверхностных плазмонов на гладкой поверхности GaAs.

5. Исследованы переходные эффекты при синхронизованном возбуждении терагерцового плазмона на поверхности легированного полупроводника световой линией, проходящей с досветовой скоростью конечную дистанцию по поверхности. Подобный досветовой источник может быть реализован при освещении поверхности полупроводника несфокусированным фемтосекундным лазерным импульсом со скошенным фронтом интенсивности. Рассчитаны поля возбуждаемых поверхностных и объемных терагерцовых волн. Исследована зависимость спектра терагерцовых поверхностных плазмонов и эффективности конверсии от проходимой источником дистанции (ширины лазерного пучка). Введена длина формирования поверхностного плазмона. Показано, что переходные эффекты можно не учитывать лишь в том случае, когда длина пробега источника по поверхности превышает длину формирования поверхностного плазмона.

СПИСОК РАБОТ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. *Bakunov M.I., Tsarev M.V., Bodrov S.B., Tani M.* Strongly subluminal regime of optical-to-terahertz conversion in GaP // *Journal of Applied Physics*. 2009. V. 105. 083111.
2. *Bakunov M.I., Bodrov S.B., Tsarev M.V.* Terahertz emission from a laser pulse with tilted front: Phase-matching versus Cherenkov effect // *Journal of Applied Physics*. 2008. V. 104. 073105.
3. *Bakunov M.I., Tsarev M.V., Hangyo M.* Cherenkov emission of terahertz surface plasmon polaritons from a superluminal optical spot on a structured metal surface // *Optics Express*. 2009. V. 17. Pp. 9323–9329.
4. *Bakunov M.I., Bodrov S.B., Tsarev M.V.* Optimizing Two-Dimensional Tilted-Front Laser Pulses for Efficient Terahertz Generation // Conference guide of 33rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves

(IRMMW-THz), California Institute of Technology, Pasadena, California, USA, September 15–19, 2008. W5D42.1486.

5. *Tsarev M.V., Bakunov M.I.* Cherenkov emission of terahertz surface plasmon polaritons from a superluminal optical spot on a structured metal surface // Proceedings of the 2nd International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (Metamaterials 2008), Pamplona, Spain, September 21-26, 2008. 13-R2-5.
6. *Bakunov M.I., Tsarev M.V.* Optical excitation of terahertz surface waves on a structured metallic surface // Abstracts of the 2nd Young Scientist Meetings on Metamaterials, Barcelona, Spain, February 7-8, 2008. P. 12.
7. *Бакунов М.И., Царев М.В.* Генерация терагерцовых поверхностных волн на структурированной металлической поверхности // Тезисы докладов конференции. «Фундаментальные и прикладные задачи нелинейной физики», Н. Новгород, 1-7 марта 2008 г. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2008. С. 169–170.
8. *Bakunov M.I., Tsarev M.V., Maslov A.V.* Transient Effects in Phase-Matched Excitation of a Terahertz Surface Wave by a Short Laser Pulse with Tilted Intensity Front // Conference Digest: Conference on Lasers and Electro-optics, and International Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe - IQEC 2007), June 17-22, 2007, Munich, Germany. CF-26-MON.
9. *Bakunov M.I., Maslov A.V., Bodrov S.B., Tsarev M.V.* Generation of terahertz surface plasmon polaritons by moving optical spots // Book of Abstracts: the International Workshop on Plasmonics and Applications in Nanotechnologies, December 5-7, 2006, Singapore. P. 81.
10. *Bakunov M.I., Tsarev M.V., Bodrov S.B.* Generation of terahertz surface waves by short laser pulses at semiconductor surfaces: transient effects // Technical Digest of the 3rd International Conference on Laser Optics for Young Scientists (LOYS), June 26-30, 2006, St. Petersburg, Russia. P. 36.
11. *Бакунов М.И., Царев М.В., Бодров С.Б.* Нестационарный режим конверсии оптических импульсов в терагерцовые поверхностные волны // Труды X Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах», Звенигород, 22-27 мая 2006 г. Секция 4-5, С. 64-66.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение

Глава 1. «Сильно досветовой» режим оптико-терагерцовой конверсии в кристалле GaP

- 1.1. Условия «сильно досветового» режима
- 1.2. Модель нелинейного источника. Основные уравнения
- 1.3. Генерация терагерцовых волн планарным оптическим импульсом. Двойная инверсия терагерцовых импульсов
- 1.4. Генерация терагерцовых волн сфокусированным оптическим импульсом. Линейный (точечный) терагерцовый источник
- 1.5. Фундаментальные ограничения на размер терагерцового пятна
- 1.6. Экспериментальная проверка предсказаний теории
- 1.7. Выводы

Глава 2. Теория генерации терагерцового излучения лазерными импульсами со скошенным фронтом интенсивности

- 2.1. Динамические стадии генерации терагерцового излучения в кристалле
- 2.2. Стационарный режим генерации в однородной среде: общая теория и применение к LiNbO_3
- 2.3. Обобщение формул Френеля для вынужденных терагерцовых полей
- 2.4. Спектральные, пространственные и энергетические характеристики терагерцовой эмиссии из кристалла LiNbO_3
- 2.5. Выводы

Глава 3. Черенковское излучение терагерцовых поверхностных плазмонов сверхсветовым источником на структурированной поверхности металла

- 3.1. Схема оптико-терагерцовой конверсии. Теоретическая модель
- 3.2. Расчёт и анализ генерируемых терагерцовых полей
- 3.3. Энергетика конверсии и оптимальные параметры
- 3.4. Выводы

Глава 4. Переходные эффекты при генерации терагерцовых поверхностных плазмонов

- 4.1. Теоретическая модель. Основные уравнения
- 4.2. Общее решение в Фурье-представлении
- 4.3. Переходные процессы после начала движения нелинейного источника (случай полубесконечного лазерного пучка)
- 4.4. Генерация поверхностных плазмонов лазерным пучком конечной апертуры
- 4.5. Выводы

Заключение

Литература

Список работ по диссертации

Подписано в печать 22.05.2009. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1. Тир. 100. Зак. 324.

Типография Нижегородского госуниверситета
Лицензия № 18-0099
603000, Н. Новгород, ул. Б. Покровская, 37.