

## СЕКЦИЯ 6. МЕТОДЫ ГЕНЕРАЦИИ И ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ВОЛН

<b>Терагерцовая проводимость гетероструктур <math>\text{LaAlO}_3/\text{LaNiO}_3</math></b> <i>А.А. Борис, А.В. Борис, Б.П. Горшунов</i> .....	2
<b>Генерация широкополосного терагерцового излучения в газовых и плазменных средах</b> <i>А.В.Бородин, М.Н.Есаулков, И.И.Курицин, А.П.Шкуринов</i> .....	4
<b>Вакуумные приборы терагерцового диапазона</b> <i>В.Л. Братман</i> .....	6
<b>О терагерцовых солитонах в ДНК</b> <i>А.Н. Бугай</i> .....	7
<b>Электродинамические свойства веществ на терагерцовых частотах</b> <i>А.А. Волков</i> .....	9
<b>Терагерцовое излучение в магнитном переходе при комнатной температуре</b> <i>Ю.В.Гуляев, П.Е. Зильберман, А.И.Панас, С.Г. Чигарев, Э.М. Эпштейн, Г.М. Михайлов</i> .....	10
<b>Терагерцовая спектроскопия натурального и моноизотопного кремния</b> <i>П.С.Королёв, Б.П.Горшунов, В.П.Калинушкин, В.В.Паршин, А.С.Прохоров, П.Г.Сенников, Е.А.Серов, И.Е.Спектор, N.Abrosimov, M.Dressel, H.-J.Pohl, H.Riemann</i> .....	12
<b>Поверхностные терагерцовые плазмоны на структурированной поверхности металла</b> <i>Назаров М.М., Рябов А.Ю., Шкуринов А.П.</i> .....	15
<b>Физико-химические основы применения терагерцовой спектроскопии в биологических исследованиях</b> <i>О.П. Черкасова, М.М. Назаров, А.П. Шкуринов</i> .....	18
<b>Анализ генерации волн терагерцового диапазона при нелинейном преобразовании света в симметричной щелевой волноводной структуре на ниобате лития</b> <i>В.В. Щербина, С.М. Шандаров, Д.О. Анисимов, М.В. Бородин, Л.Я. Серебренников, Л.С. Коханчик</i> .....	21

## ТЕРАГЕРЦОВАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ГЕТЕРОСТРУКТУР $\text{LaAlO}_3/\text{LaNiO}_3$

А.А. Борис<sup>1,2</sup>, А.В. Борис<sup>3</sup>, Б.П. Горшунов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

<sup>3</sup>Max Planck Institute for Solid State Research, Stuttgart, Germany

[borezzz@gmail.com](mailto:borezzz@gmail.com)

Конкуренция между коллективными квантовыми фазами в материалах с сильно коррелированными электронами сильно зависит от размерности системы. Уровень современной экспериментальной физики твёрдого тела позволяет эту размерность контролировать [1]. На диэлектрических подложках  $\text{SrLaAlO}_4$  нами были приготовлены с атомарно точной последовательностью слоёв и исследованы 4 типа гетероструктур на основе парамагнитного металла  $\text{LaNiO}_3$  и широкозонного диэлектрика  $\text{LaAlO}_3$  (рис. 1): а) 48 слоёв (2 у.с.\*2 у.с.); б) 66 слоёв (2 у.с.\*2 у.с.); в) 28 слоёв (4 у.с.\*5 у.с.); г) 33 слоя (4 у.с.\*4 у.с.) (где у.с. – “unit cell” обозначает размер постоянной решётки,  $\approx 4\text{Å}$ ). Дополнительный интерес к данным образцам обусловлен возможным возникновением сверхпроводимости, как было предсказано в работах [2,3].

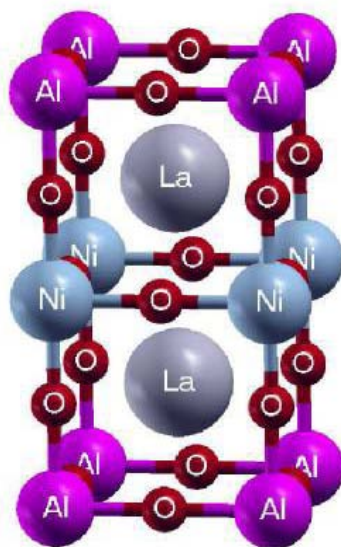


Рис. 1. Схематичное изображение гетероструктур  $\text{LaAlO}_3/\text{LaNiO}_3$

С помощью терагерцового (ТГц) ЛОВ-спектрометра были выполнены измерения спектров эффективной проводимости [4] гетероструктур в диапазоне частот 200 – 1200 ГГц при температурах 5 – 300 К (ЛОВ – лампа обратной волны, генератор ТГц излучения). Измерения выполнялись в нулевом магнитном поле, а также в полях до 8 Тл, в геометриях Фогта и Фарадея. Эксперимент показал, что при охлаждении в гетероструктурах с

толщиной слоя  $\text{LaNiO}_3$  порядка  $8\text{\AA}$  (2 у.с.) наблюдается последовательность фазовых переходов типа «металл-диэлектрик» (при  $T \approx 150\text{K}$ ) и «парамагнетик-антиферромагнетик» (при  $T \approx 50\text{K}$ ), в то время как образцы с более толстым слоем  $\text{LaNiO}_3$  остаются металлическими и парамагнитными при всех температурах (рис. 2). Признаков сверхпроводимости нами обнаружено не было.

Таким образом, металл-оксидные гетероструктуры позволяют контролировать размерность и поведение коллективной фазы систем коррелированных электронов.

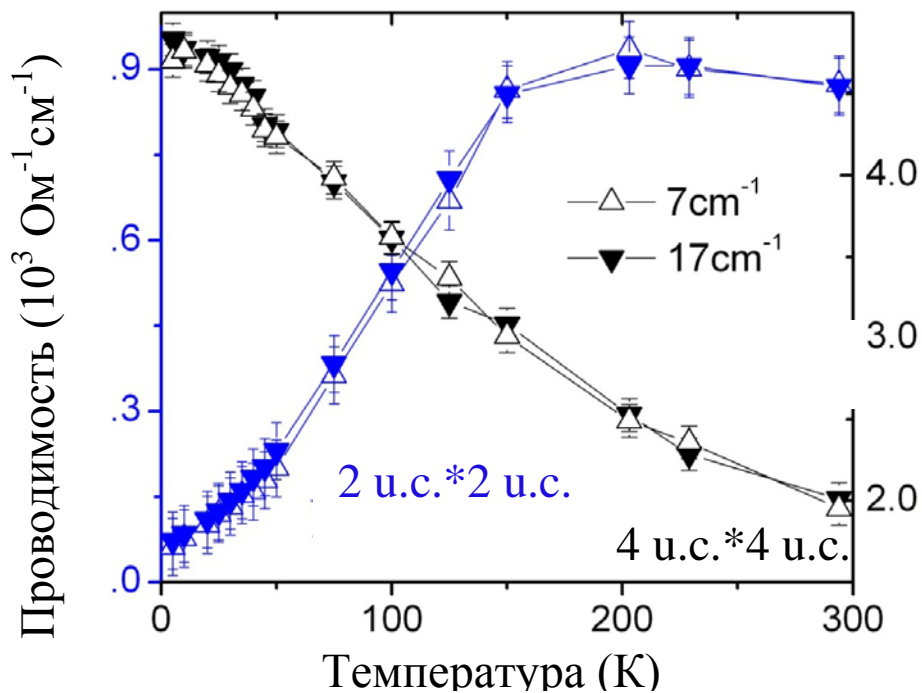


Рис. 2. Температурные зависимости проводимости образцов б) (2 у.с.\*2 у.с.) и г) (4 у.с.\*4 у.с.) при разных частотах в интерференционных максимумах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. G. Catalan // Phase Transitions. 2008. V. 81. No.7. P. 729-749.
2. J. Mannhart et al. // Science. 2010. V. 327. P. 1607-1611.
3. J. Chaloupka, G. Khaliullin // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 100. P. 016404.
4. Б.П. Горшунов, А.С. Прохоров, И.Е. Спектор, А.А. Волков // Известия ВУЗов, Радиофизика. 2005. Т. 48. No 10-11. С. 926-931.

## ГЕНЕРАЦИЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГАЗОВЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ СРЕДАХ

А.В.Бородин, М.Н.Есаулков, И.И.Курицин, А.П.Шкуринов  
*Физический факультет и Международный лазерный центр МГУ им.М.В.Ломоносова*  
[ashkurinov@gmail.com](mailto:ashkurinov@gmail.com)

Генерация импульсного терагерцового (в различных источниках низкочастотного, переходного и т.п.) излучения большой мощностью (до сотен кв/см) с предельно широким спектром (от 0.1 до 20 ТГц) стала возможной в последние годы благодаря реальному применению различных схем и оптического выпрямления в газовых и плазменных средах [1]. Описано и экспериментально подтверждено несколько ключевых механизмов генерации импульсного низкочастотного излучения при оптическом пробое газов при использовании феноменологического подхода [2], гидродинамической теории [3] и квантовомеханического подхода [4]. Конструктивная интерференция нескольких когерентных вкладов в импульсный сигнал низкочастотного излучения определяет его интенсивность, спектр, поляризацию и его диаграмму направленности. В работе подробно исследуются эти вклады и анализируются критерии оптимизации параметров излучения генерируемого в газовой среде при фокусировке в нее фемтосекундного излучения. При этом подробно рассматриваются специфические особенности процесса генерации этого излучения в как в режиме многофотонной ионизации газа, так и в до ионизационном режиме при учете резонансных и нерезонансных вкладов нейтральных атомов [5]. Рассмотрена также генерация переходного терагерцового излучения при прохождении лазерного импульса через слой разреженной плазмы с учетом наличия выраженной границы. Показано, что возбуждение терагерцовых волн связано с раскачкой слабозатухающей, антисимметричной вытекающей моды плазменного слоя. Исследованы спектральные, угловые и энергетические характеристики терагерцового излучения, а также пространственно-временная структура излучаемых волн. Данный подход позволяет описать форму и ширину аномально широкого спектра переходного излучения при использовании импульсов фемтосекундной длительности.

### ЛИТЕРАТУРА

1. D. J. Cook and R. M. Hochstrasser, *Opt. Lett.* 25, 1210-1212 (2000).
2. X. Xie, J. Dai, and X.-C. Zhang, *Phys. Rev. Lett.* 96, 075005 (2006).
3. A.V. Balakin et al. // *J. Opt. Soc. Am. B*, 27, No. 1 (2010).
4. N. Karpowicz and X.- C. Zhang, *Phys. Rev. Lett.* 102, 093001 (2009).
5. G. A. Askar'yan, *Phys. Rev. Lett.* 57, 2470 (1986).



## ВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

В.Л. Братман

<sup>1</sup>*Институт прикладной физики РАН*  
bratman@appl.sci-nnov.ru

В последние годы возникла необходимость в источниках с частотами 0,3-1,5 ТГц и более высокими мощностями излучения, чем могут обеспечить лампы обратной волны (ЛОВ). Заметное увеличение мощности может быть получено в приборах, основанных на черенковском взаимодействии прямолинейных электронных пучков с медленными волнами (клинотроны, клистроны с распределенным взаимодействием, оротроны). На порядки более высокую мощность можно получить в приборах, основанных на тормозном излучении криволинейных пучков, взаимодействующих с быстрыми волнами (ЛСЭ, гиротроны). ЛСЭ обеспечивают излучение во всем ТГц диапазоне, но для их работы требуются очень большие энергии частиц. В гиротронах используются во много раз меньшие энергии электронов, и потому, несмотря на необходимость очень сильных магнитных полей, они более доступны для многих лабораторий. Недавно импульсные гиротроны на основной, второй и третьей циклотронных гармониках преодолели рубеж 1 ТГц. Для работы на высоких гармониках требуется магнитное поле, которое в настоящее время уже рутинно получается с помощью криомагнитов. В ближайшее время во всем диапазоне частот до 1,5 ТГц будут созданы мощные непрерывные гиротроны, появление которых будет стимулировать развитие ряда новых направлений в таких приложениях, как электронный парамагнитный резонанс, динамическая поляризация ядер при ядерном магнитном резонансе высокого разрешения, получение и использование терагерцового разряда в газах и многие другие.

## О ТЕРАГЕРЦОВЫХ СОЛИТОНАХ В ДНК

А.Н. Бугай

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

bugay\_aleksandr@mail.ru

Развитие нелинейной физики ДНК началось ещё в 1980г. и представляет собой одну из быстроразвивающихся областей нелинейной науки [1]. Исследования в данной области были посвящены описанию процессов денатурации, транскрипции, спонтанных раскрытий водородных связей между основаниями и т.д., что получило проверку, например, в экспериментах по рассеянию нейтронов. В большинстве работ рассматривались собственные возбуждения в ДНК типа кинков и бризеров, причем система считалась консервативной.

Собственные частоты внутримолекулярных колебаний нуклеиновых кислот и белков лежат в области частот 0.1-10 ТГц, что представляет широкие возможности для терагерцовой спектроскопии [2]. В то же время известно, что интенсивное воздействие электромагнитных полей соответствующих частот вызывает изменение конформации белков и ДНК, причем механизм такого эффекта детально не изучен [3].

В настоящей работе рассмотрена нелинейная динамика ДНК при воздействии терагерцового излучения, причем учтено также влияние среды.

При описании движения групп атомов, составляющих макромолекулу, используют классический гамильтониан полуфеноменологического характера, с выделением принципиальных степеней свободы. В рассматриваемом случае имеем [4]

$$H = \sum_n \left[ \frac{m_n}{2} (\dot{R}_n^2 + R_n^2 \dot{\theta}_n^2) + g (\sqrt{L_0^2 - (R_{n+1} - R_n)^2 - 4R_{n+1}R_n \sin^2[(\theta_{n+1} - \theta_n)/2]} - h)^2 + D_n (\exp[-\alpha(R_n - R_0)] - 1)^2 \right], \quad (1)$$

где  $L_0^2 = h^2 + 4R_0^2 \sin^2(\theta_0/2)$ ,  $R$  - расстояние между комплиментарными основаниями,  $\theta$  - угол кручения,  $m$  - приведенная масса пары оснований,  $h$  - расстояние между соседними нуклеотидами вдоль оси спирали, величины  $D$  и  $g$  характеризуют энергии водородных связей и стэкинг-взаимодействия.

Уравнения движения, соответствующие (1), дополним членами, отвечающими за диссипацию и взаимодействие с внешним полем. Для силы, соответствующей диссипативным эффектам (взаимодействие с близлежащими молекулами воды и противоионами), в общем виде имеем

$$\vec{F}_n = \{ \gamma_n \int \chi(t-t', E) R_n(t') dt', \sigma_n \int \chi(t-t', E) \theta_n(t') dt' \}, \quad (2)$$

где учтена зависимость от частоты и интенсивности накачки. С увеличением интенсивности выше некоторого порога величина затухания уменьшается [5].

Взаимодействие электромагнитного поля  $E$  с упругими колебаниями выражается следующим образом:

$$\vec{Q}_n = \{2eE_L R_n \cos \theta_n, \mu_n E_L \sin \theta_n\}, \quad (3)$$

где  $E_L$  - локальное поле,  $\mu$  - постоянный дипольный момент нуклеотида.

Записывая с помощью (1)-(3) уравнения движения и переходя к континуальному приближению, в малоамплитудном пределе получим двухкомпонентное комплексное уравнение типа Гинзбурга-Ландау, имеющее решения типа диссипативных солитонов.

Таким образом, при воздействии терагерцового излучения возможно возбуждение конформационных возмущений типа диссипативных солитонов. Подобный механизм позволяет качественно объяснить процесс изменения конформации ДНК, наблюдаемый в экспериментах, а также воздействие терагерцового излучения на биологические процессы [6].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 09-02-00503а) и Фонда некоммерческих программ «Династия».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. L.V. Yakushevich, "Nonlinear Physics of DNA", Wiley-VCH, 2004.
2. O.P. Cherkasova, M.M. Nazarov, A.P. Shkurinov, V.I. Fedorov // Radiophysics and Quantum Electronics, 2009, V.52, No.7, P.518-523.
3. V.I. Fedorov, S.S. Popova // Millimetr. Volny Biol. Med. 2006, No.2, P.3.
4. M. Barbi, S. Cocco, M. Peyrard // Phys. Lett. A, 1999, V. 253, P.358.
5. M. V. Mesquita, A. R. Vasconcellos, R. Luzzi // Int. J. Quantum Chem., 1996, V.60, No.2, P.689-697.
6. J. Bock et al. // PLoS ONE 2010, V.5, No.12., P. e15806.



## ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ НА ТЕРАГЕРЦОВЫХ ЧАСТОТАХ

А.А. Волков

*Институт общей физики им А.М. Прохорова, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38*

E-mail: aavol@bk.ru

Сегодня широко обсуждается возможность использования терагерцового излучения, генерируемого нелинейно-оптическими методами, для решения научных и прикладных задач. Новый экспериментальный подход - спектроскопия временного разрешения - обещает широкополосность, удобство и быстроту измерений, отказ от использования соотношений Крамерса–Кронига, вносящих в измерения принципиально неустранимую неопределенность. Предполагается использование метода в широких масштабах и проведение с его помощью массовых рутинных измерений.

Современный процесс освоения терагерцового участка спектра (0.3 – 3 ТГц) со стороны оптики в некоторых чертах схож с тем, который состоялся несколько десятилетий тому назад со стороны радиодиапазона. Генераторами терагерцового излучения тогда служили миниатюризированные электровакуумные приборы – лампы обратной волны (ЛОВ). За сорок лет найдено множество областей адекватного и эффективного применения метода ЛОВ-спектроскопии. Выполнен широкий круг исследований по электродинамике веществ на терагерцовых частотах. Получены широкомасштабные частотные панорамы диэлектрического отклика веществ разных классов - диэлектриков, полупроводников, металлических пленок, сверхпроводников, ионных проводников, кристаллов с несоразмерной фазой [1-3]. Накопленный материал позволил связать в рамках единого подхода качественно разные данные инфракрасных и радиочастотных измерений.

В докладе дается обзор электродинамических панорам и обсуждаются проблемы физики твердого тела, требующие для своего разрешения изучения диэлектрических спектров на терагерцовых частотах.

### ЛИТЕРАТУРА

1. G.V. Kozlov and A. A. Volkov, Millimeter and Submillimeter Wave Spectroscopy of Solids, edited by G. Gru'ner (Springer, Berlin, 1998), p. 51-109.
2. Б.Г. Горшунов, А.А. Волков, А.С. Прохоров, И.Е. Спектор // Физика твердого тела. 2008. Т. 50. В. 11. С. 1921-1932.
3. Б.Г. Горшунов, А.А. Волков, А.С. Прохоров, И.Е. Спектор и др. // Квантовая электроника. 2007. Т. 37. № 10. С. 1-8.

## ТЕРАГЕРЦОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В МАГНИТНОМ ПЕРЕХОДЕ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Ю.В.Гуляев<sup>1</sup>, П.Е. Зильберман<sup>1</sup>, А.И.Панас<sup>1</sup>, С.Г. Чигарев<sup>1</sup>, Э.М. Эпштейн<sup>1</sup>,  
Г.М. Михайлов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФИРЭ им.В.А.Котельникова РАН,

<sup>2</sup> ИПТМ РАН

[chig50@mail.ru](mailto:chig50@mail.ru)

Предлагаемое сообщение относится к разделу электроники - спинтронике. В спинтронике рассматривается не традиционное взаимодействие заряда электрона с электромагнитными полями, а взаимодействие его собственного магнитного момента с электромагнитным полем, в том числе и с магнитным полем вещества, как правило, ферромагнетика. Рассматривается возможность формирования излучения за счет достижения инверсной заселенности энергетических спиновых подзон. Аналогичный механизм используется в инжекционных полупроводниковых лазерах. Но рассматриваемый процесс наблюдается не в полупроводниках, а в металлическом магнитном переходе, где разделение электронов по энергиям осуществляется за счет разной ориентации их спинов. Впервые, возможность получения электромагнитного излучения на таком принципе спинтроники рассмотрена в [1]. Первые теоретические [2] и экспериментальные [3] результаты, полученные в ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, показывают перспективность этого направления.

В предлагаемом сообщении рассматриваются результаты экспериментальных исследований работы спин-инжекционного излучателя. Особый интерес к результатам, по мнению авторов, может вызвать исследуемый диапазон частот 1 – 10 ТГц, наименее освоенный к настоящему времени.

Исследуемая структура состояла из магнитного стержня с острием диаметром 10 -30 мкм, пленки из магнитомягкого материала (пермаллоя) наноразмерной толщины, нанесенной на подложку из полупроводника или диэлектрика. Подложка со стороны пермаллоя прижималась к массивной медной пластине с отверстием, через которое стержень подводился к пленке. Фактически пластина выполняла функцию коллектора. В такой системе наибольшая плотность тока достигалась в пленке на границе острия стержня. По мнению авторов именно в этой области при достижении определенной плотности тока ( $\sim 10^7$  А/см<sup>2</sup>) возможны процессы магнитной природы, приводящие к появлению люминесценции в виде излучения электромагнитных волн. Вопрос формирования поля излучения в ближней зоне рассматриваемой структуры представляет

самостоятельную электродинамическую задачу, которая здесь не рассматривается.

Исследовалось поле излучения в дальней области на расстоянии  $R$  между излучателем и объективом детектора (ячейки Голея) не менее 100 мм, то есть  $R \gg \lambda$  -длины волны излучения исследуемого диапазона частот от 1 до 10 ТГц. Диапазон частот определялся двумя фильтрами, фильтром низких частот, представлявшим собой металлическую сетку с ячейкой  $125 \times 125$  мкм и фильтром высоких частот фирмы «ТИДЕКС».

Результаты измерения, прежде всего, показывают довольно равномерное распределение излучения во всем телесном угле излучателя  $4\pi$ . Это дало возможность оценить спектральную интенсивность излучения во всем телесном угле излучателя в исследуемом диапазоне, которая составила величину порядка 10 мВт. Так как исследуемый диапазон относится к области дальнего ИК, в экспериментах особое внимание было уделено исследованию вопроса о влиянии на излучение разогрева излучателя, тем более что в экспериментах преднамеренно не использовалось принудительное охлаждение излучателя. Полученные результаты исследования зависимости интенсивности излучения от тока при его скачкообразном изменении показали, что интенсивность излучения связана главным образом с величиной тока (его плотностью). При этом теплофой фон не превышал 10%. В пользу нетеплового характера наблюдаемого излучения говорит и наличие порогового значения тока, при превышении которого начинается рост интенсивности излучения. При использовании немагнитных материалов, подобных эффектов не наблюдалось. Следует особо отметить, что исследуемый диапазон составлял около 10% от всей излучаемой мощности измеряемой без фильтров. Это говорит о том, что основная частота излучения (пик излучения) лежит в диапазоне частот выше 10 ТГц.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 10-02-00030-а.

## ЛИТЕРАТУРА

1. А.М.Кадигров, Z.Ivanov, et af. // Europhys.Lett.V. 67. P.948. 2004.
2. Ю.В.Гуляев и др.// РЭ. 55. 715. 2010.
3. Ю.В.Гуляев и др. // РЭ. 55. 1211. 2010.

## ТЕРАГЕРЦОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ НАТУРАЛЬНОГО И МОНОИЗОТОПНОГО КРЕМНИЯ

П.С.Королёв<sup>1,2</sup>, Б.П.Горшунов<sup>1</sup>, В.П.Калинушкин<sup>1</sup>, В.В.Паршин<sup>3</sup>,  
А.С.Прохоров<sup>1</sup>, П.Г.Сенников<sup>3,4</sup>, Е.А.Серов<sup>3</sup>, И.Е.Спектор<sup>1</sup>, N.Abrosimov<sup>5</sup>,  
M.Dressel<sup>6</sup>, H.-J.Pohl<sup>7</sup>, H.Riemann<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Учреждение Российской Академии Наук Институт Общей Физики РАН, Москва

<sup>2</sup> Физический факультет МГУ, Москва

<sup>3</sup> Учреждение Российской Академии Наук Институт Прикладной Физики РАН,  
Нижний Новгород

<sup>4</sup> Учреждение Российской Академии Наук Институт Химии Высокочистых  
Веществ РАН, Нижний Новгород

<sup>5</sup> Leibniz Institut für Kristallzüchtung, Berlin

<sup>6</sup> I.Physikalisches Institut, Universität Stuttgart, Stuttgart

<sup>7</sup> VITCON Projectconsult GmbH, Jena

[korolev.petr@gmail.com](mailto:korolev.petr@gmail.com)

Одно из направлений совершенствования параметров микроэлектронных структур включает изучение электронных свойств изотопов кремния. Натуральный кремний  $^{nat}\text{Si}$  содержит изотопы  $^{28}\text{Si}$  (92.23%),  $^{29}\text{Si}$  (4.67%) и  $^{30}\text{Si}$  (3.10%). Разработанные в последние годы методики выращивания объёмных моноизотопных образцов  $^{28}\text{Si}$  с обогащением до 99,995% [1] предоставляет возможность всестороннего исследования их электронных характеристик. В моноизотопном  $^{28}\text{Si}$  уже обнаружены значительные, в сравнении с  $^{nat}\text{Si}$ , изменения ряда физических свойств [1-3].

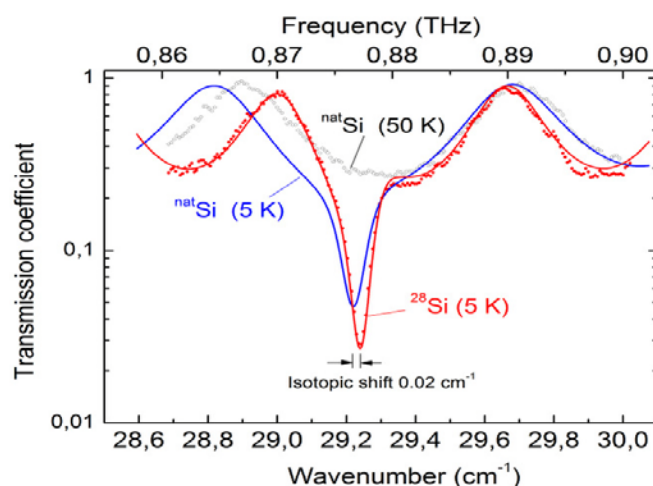
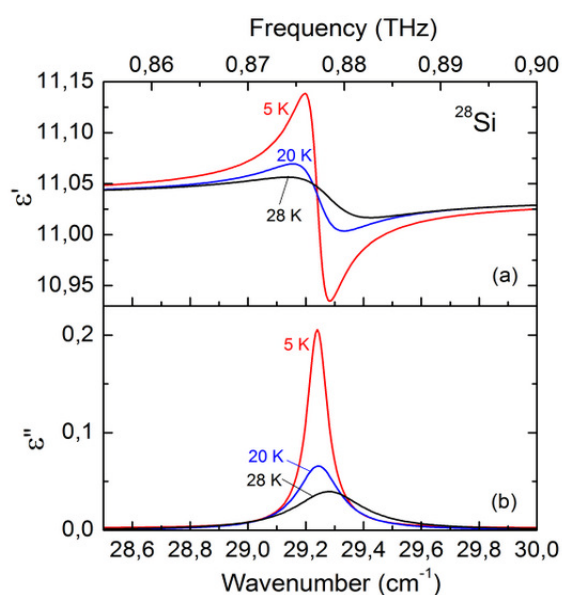


Рис.1. Спектры коэффициента пропускания слоёв натурального ( $^{nat}\text{Si}$ ) и изотопно-обогащённого ( $^{28}\text{Si}$ ) кремния. Глубокие минимумы вызваны кислородными примесными линиями поглощения.

В данной работе мы представляем результаты исследований диэлектрических свойств натуральных и моноизотопных кристаллов Si

бесконтактными методами резонаторной [4] и квазиоптической [5] терагерцовой-субтераерцовой спектроскопии. На частотах 180 ГГц – 1.2 ТГц и при температурах от комнатной до гелиевой нами измерены спектры комплексной диэлектрической проницаемости нескольких низкоомных и высокоомных кристаллов  $^{28}\text{Si}$  (99,99%) и  $^{\text{nat}}\text{Si}$ . Определены микроскопические параметры основных носителей заряда. Кроме того, в широком интервале температур впервые выполнены сравнительные измерения параметров примесных кислородных линий поглощения (около 870 ГГц) в кристаллах  $^{28}\text{Si}$  и  $^{\text{nat}}\text{Si}$ . Результаты представлены на Рис.1 в виде спектров коэффициента пропускания плоскопараллельных образцов  $^{\text{nat}}\text{Si}$  и



$^{28}\text{Si}$ .

Рис.2. Спектры действительной и мнимой составляющей диэлектрической проницаемости для  $^{28}\text{Si}$ , отображающие температурную зависимость поглощения на примеси кислорода. Спектр получен путем применения выражения (1) для коэффициента пропускания, изображенного на Рис.1.

На фоне осцилляций, обусловленных интерференцией монохроматического ТГц излучения, хорошо видны глубокие минимумы, обусловленные резонансным поглощением на кислородной примеси. Спектры пропускания, измеренные при различных температурах, были обработаны с применением модели Лорентциана:

$$\varepsilon(\nu) = \varepsilon'(\nu) + i\varepsilon''(\nu) = \frac{f}{\nu\gamma + i(\nu_0^2 - \nu)} \quad (1)$$

где  $f = \Delta\varepsilon\nu_0^2$  - сила осцилляции,  $\Delta\varepsilon$  – диэлектрический вклад,  $\nu_0$  – собственная частота и  $\gamma$  - затухание. Это выражение используется в качестве стандартной формулы для описания коэффициента пропускания в плоско-параллельных пластинах. В докладе обсуждаются полученные температурные зависимости параметров линий поглощения, представленные на Рис.3.

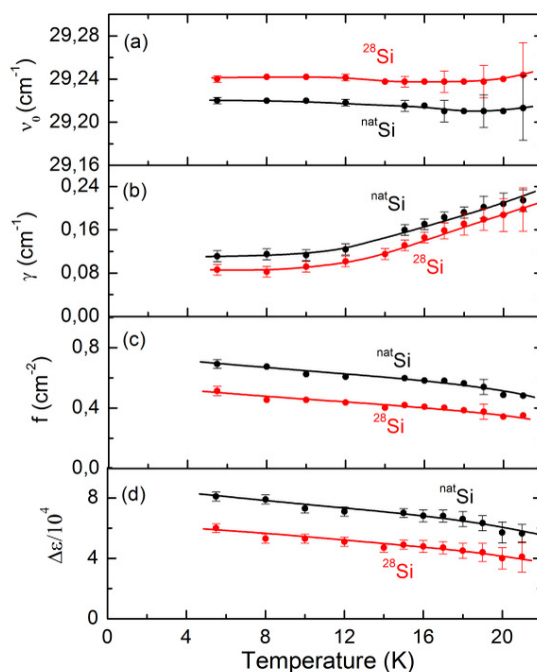


Рис.3. Температурные зависимости параметров примесных кислородных линий поглощения в натуральном и моноизотопном кремнии: собственной частоты  $\nu_0$ , затухания  $\gamma$ , силы осцилляций  $f$  и диэлектрического вклада  $\Delta\varepsilon$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. P.Becker et al. // Phys. Status Solidi A. V.207, No1, 49-66 (2010).
2. Kato J. et al. // Phys. Rev. B. 2003. V.68, P.035205.
3. Cardona M., Thewalt M.L.W. // Rev. Mod. Phys. V.77, P.1173 (2005).
4. Паршин В.В. и др.// Изв. ВУЗов, «Радиофизика». 2009. Т.ЛП. вып.8. С.583-594.
5. Горшунов Б.П. и др. // ФТТ. 2008. Т.50, вып.11. С.1921-1932.

## ПОВЕРХНОСТНЫЕ ТЕРАГЕРЦОВЫЕ ПЛАЗМОНЫ НА СТРУКТУРИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА

Назаров М.М., Рябов А.Ю., Шкуринов А.П.

МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, каф. ОФиВП, Москва, Россия.

Плазмоника - это направление современной оптики, состоящее в изучении взаимодействия электромагнитных волн с металлическими микро и нано структурами и тонкими плёнками в условиях возбуждения поверхностных или локализованных плазмонов. В последнее время актуальная и популярная тема плазмоники начала пересекаться фундаментально новой темой метаматериалов. В обоих подходах создаются среды с искусственными оптическими свойствами за счёт субволновых проводящих структур. Кроме того, все эти исследования из видимого диапазона частот расширились до нового и востребованного терагерцового (субмиллиметровые длины волн) диапазона.

Для эффективного возбуждения ПП электромагнитным излучением необходимы специальные устройства, позволяющие скомпенсировать расстройку длин волновых векторов плазмона и падающего излучения – призма, острый край, либо дифракционная решётка. По сравнению с видимым диапазоном затухание в металле для плазмонов в ТГц диапазоне на 4-6 порядков меньше [1], хотя большинство экспериментальных данных не согласуется с моделью Друде для металла в ТГц диапазоне. Проблему слабой локализации поля ТГц ПП на металле сейчас можно решить, используя субволновые отверстия или штрихи на поверхности, сохранив при этом достаточную длину пробега.

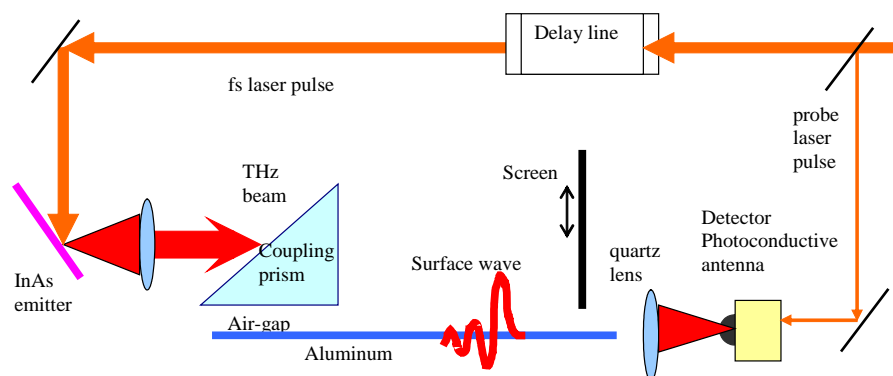


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для генерации терагерцовых импульсов и преобразования их в поверхностные плазмоны.

Кроме приложений для спектроскопии тонких плёнок и передачи информации, плазмоны представляют фундаментальный интерес как волны пониженной размерности, интересно исследовать, как плазмоны отражаются, преломляются при прохождении стыка двух разных



поверхностей, как можно сфокусировать или отразить пучок плазмонов, какие особенности у короткого импульса ПП. Для ответов на эти вопросы, экспериментальные исследования в ТГц диапазоне наиболее перспективны (в видимом диапазоне – сильное затухание плазмонов, в микроволновом – слишком большие масштабы и слабая локализация).

Для генерации и детектирования сверхкоротких терагерцовых импульсов в наших работах используются фемтосекундных лазерные импульсы и нелинейно-оптические либо полупроводниковые устройства – так называемый, известный метод THz-time domain spectroscopy (рис.1). Для преобразования излучения в поверхностную волну и обратно используется дифракционная решётка или призма. В случае решётки достигается высокая эффективность преобразования в ПП, но для узкого диапазона частот [2], для призмы возможно возбуждение широкополосного плазмона.

Изучена локализация поля ТГц плазмона при его распространении по гладкой и по модифицированной поверхности алюминия, изучено отражение плазмонов. Показано, что Брэгговская решётка может работать как селективное зеркало и в ТГц диапазоне частот. Исследуется прохождения ПП через разрыв в металлической поверхности, через ступеньку на поверхности, отражение от Брэгговской решетки.

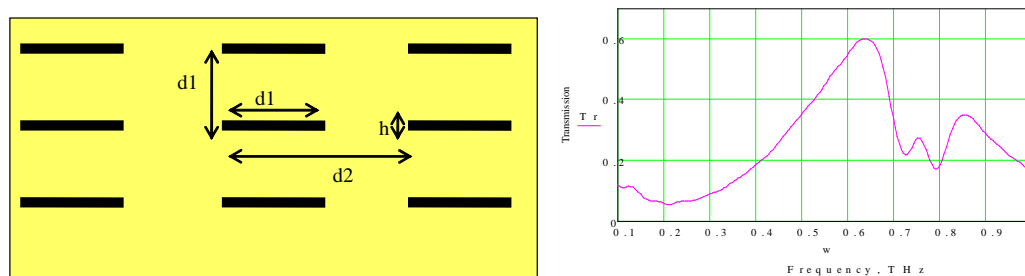


Рис. 2. а) схема субволновых отверстий в плёнке металла, б) спектр пропускания структурированной пленки металла

Для случая субволновых структур (отверстий) в пленке металла (Рис. 2 а) появляется ряд новых интересных свойств, таких как необыкновенно большое пропускание определённых областей спектра, изменение эффективной диэлектрической проницаемости, усиление локализации плазмона. Эти явления экспериментально изучены методами терагерцовой импульсной спектроскопии

## ЛИТЕРАТУРА

1. М. Nazarov et all.// Optics Communications. 277. 33–39. 2007.



2. L.S. Mukina, M.M. Nazarov and A.P. Shkurinov, *Surface Science*, 600. 4771-477. 2006.

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРАГЕРЦОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ В БИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

О.П. Черкасова<sup>1</sup>, М.М. Назаров<sup>2</sup>, А.П. Шкуринов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск*

<sup>2</sup>*Физический Факультет и Международный Лазерный Центр МГУ им. М.В.*

*Ломоносова, Москва*

[chrom@laser.nsc.ru](mailto:chrom@laser.nsc.ru)

Терагерцовый диапазон (ТГц) электромагнитного спектра занимает промежуточное положение между оптическим и радио-диапазонами. Излучение этого диапазона характеризуется тем, что имеет низкую энергию фотонов (0,04 – 0,004 эВ) и не способно вызывать деструкцию и ионизацию вещества. В отличие от ближнего инфракрасного диапазона, в котором лежат характеристические частоты локализованных колебаний отдельных химических связей, спектральный отклик молекулярных систем в ТГц диапазоне несет информацию о медленных молекулярных движениях, относящихся к молекулам в целом, к их вращениям и фононным колебаниям кристаллической решетки молекулярных кристаллов. В диапазоне частот 0,1...10 ТГц лежат собственные частоты колебательно-вращательных переходов в молекулах воды и биологических молекулах, в том числе нуклеиновых кислот и белков, а также частоты межмолекулярных взаимодействий. Колебательные моды в биологических молекулах чувствительны к изменению конформации молекул при различных воздействиях, таких, как гидратация, окисление, ферментативные реакции, связывание с лигандами [1, 2]. Методы колебательной спектроскопии применяют для исследования динамики образования пространственных структур биополимеров, изучения вклада различных нековалентных взаимодействий в функционирование и структуру биомолекул. Развитие методов терагерцовой импульсной спектроскопии открывает новые перспективы в биологических исследованиях, так как позволяет за одно измерение провести анализ широкого спектра частот и одновременно получать информацию, как о преломлении, так и о поглощении образца. В данной работе представлен анализ применения ТГц спектроскопии для исследования биологических объектов разного уровня сложности: от отдельных аминокислот и важнейших молекул-регуляторов, таких, как стероидные гормоны, до биополимеров нуклеиновых кислот и белков.

В работе был использован терагерцовой импульсный спектрометр, подробно описанный в статьях [3, 4]. Были исследованы сухие препараты в форме поликристаллических образцов, тонкие пленки биомолекул на кварцевых подложках, водные растворы ДНК и бычьего сывороточного альбумина (БСА).

Было получено, что небольшие биологические молекулы, такие, как аминокислота триптофан имеют несколько характеристических линий поглощения при 1.45, 1.79, 2.22, 3.07, 3.67 и 3.94 ТГц, первые две из которых отвечают за торсионные колебания боковой цепи и за колебания кольца молекулы [2].

Стероидные гормоны имеют уже более сложное строение: четыре сопряженных кольца с различными боковыми заместителями. Такого типа молекулярные системы обычно обладают высокой конформационной подвижностью, что проявляется в виде низкочастотных колебаний, которые играют значительную роль в гормон-рецепторном связывании и в конечном итоге, в реализации биологического действия этих веществ [5]. Стероиды образуют кристаллы, молекулы в которых связаны водородными и Ван-дер-ваальсовыми связями. Для молекулярных кристаллов, в которых существует “дальний” порядок расположения молекул, связанных нековалентными межмолекулярными связями, возбуждение “решеточных” фононных колебаний увеличивает интенсивность тех внутримолекулярных колебаний, которые происходят коррелированно с колебаниями кристаллической решетки. Это приводит к тому, что спектры стероидов в ТГц диапазоне частот имеют интенсивные полосы поглощения, которые однозначно характеризуют исследуемое вещество. При исследовании стероидов, связанных последовательными биохимическими превращениями и имеющими одинаковые параметры кристаллической решетки был выявлен ряд закономерностей. Для стероидов, не связанных водородными связями в кристалле наблюдаются высокочастотные колебания, и ТГц спектр поглощения имеет достаточно узкие для молекулярных кристаллов линии. При появлении гидроксильной группы в молекуле стероида и соответственно, межмолекулярной водородной связи, происходит демпфирование некоторых типов движений, наблюдается существенное уширение линий и уменьшение их общего числа. В работе приводится анализ применимости двух типов квантово-химических расчетов для описания природы колебаний.

Белки и нуклеиновые кислоты состоят из большого числа элементов и имеют несколько уровней организации структуры. В ТГц диапазоне частот наблюдается высокая плотность мод, которые являются оптически активными и из-за перекрывания уровней наблюдаются спектры без каких-либо характеристических линий. В спектрах сухих препаратов белков трипсина и БСА поглощение увеличивается практически линейно в зависимости от частоты. Характерных полос поглощения в спектре не наблюдается. Показатель преломления также не имеет каких-либо выраженных особенностей. Поглощение ДНК растет линейно с частотой и при 3.6 ТГц имеет максимум поглощения. Наибольший интерес представляет исследование белков и нуклеиновых кислот в водных

растворах, так как именно в этой среде биологические макромолекулы осуществляют свои важнейшие функции. Исследование водных растворов биополимеров было проведено в условиях полного внутреннего отражения. В этой же экспериментальной технике была исследована динамика взаимодействия стероида и БСА. Анализ спектров отражения водных растворов показывает, что наибольшие отличия в амплитуде коэффициента отражения наблюдаются в области 0.2-0.4 ТГц. Различия в спектрах поглощения обусловлены разным поведением исследованных биополимеров в растворах. БСА – глобулярный белок и при растворении в воде образует глобулу, на поверхности которой расположены гидрофильные группы, которые могут образовывать водородные связи с молекулами воды. Методами терагерцовой спектроскопии было показано, что в растворе около каждой молекулы БСА образуется гидратный слой из 300 молекул воды [6]. Связывание БСА с молекулами стероида приводит к изменению его спектра отражения. При растворении молекулы линейной двуцепочечной высокополимерной ДНК в воде молекулы воды группируются в плоскую спиральную ленту, обвивающую двойную спираль ДНК, что увеличивает эффективный диаметр цилиндрической макромолекулы ДНК.

Таким образом, применение ТГц спектроскопии позволяет исследовать как строение биологических молекул, влияние межмолекулярных связей на характер низкочастотных колебаний, так и исследовать динамику поведения биополимеров в растворах и их функционирование.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Xie A., Meer A.F.G., Austin R.H. // *Phys.Rev.Lett.* 2002. V. 88. No 1. P. 018102-1
2. Laman N., Harsha S.S., Grischkowsky D., Melinger J.S. // *Biophys.J.* 2008. V.94. P. 1010.
3. М.М. Назаров, А.П. Шкуринов, Е.А. Кулешов, В.В. Тучин // *Квантовая электроника.* 2008. Т. 38, № 7. С. 647.
4. Brandt N.N., Chikishev A.Yu, Kargovsky A.V. et.al. // *Vibrational Spectroscopy.* 2008. V. 47. С. 53.
5. V.A. Minaeva, B.F. Minaev, D.N. Hovorun // *Ukr. Biokhim. Zh.* 2008. Vol. 80. No 4. P. 82.
6. Xu J., Plaxco K.W., Allen S. J. // *Protein Sci.* 2006. V. 15. P. 1175.

## АНАЛИЗ ГЕНЕРАЦИИ ВОЛН ТЕРАГЕРЦЕВОГО ДИАПАЗОНА ПРИ НЕЛИНЕЙНОМ ПРЕОБРАЗОВАНИИ СВЕТА В СИММЕТРИЧНОЙ ЩЕЛЕВОЙ ВОЛНОВОДНОЙ СТРУКТУРЕ НА НИОБАТЕ ЛИТИЯ

В.В. Щербина<sup>1</sup>, С.М. Шандаров<sup>1</sup>, Д.О. Анисимов<sup>1</sup>, М.В. Бородин<sup>1</sup>, Л.Я. Серебренников<sup>1</sup>, Л.С. Коханчик<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Томск, Россия, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*

<sup>2</sup>*Черноголовка, Россия, Институт проблем технологии микроэлектроники  
Российской академии наук  
vesta-87@mail.ru*

Ниобат лития широко применяется для создания на его основе различных нелинейных устройств, использующих высокое значение коэффициента нелинейной оптической восприимчивости второго порядка  $d_{33}$ . Формирование в таком кристалле периодических доменных структур (ПДС) позволяет реализовать режим квазисинхронизма для эффективной генерации второй оптической гармоники (ГВГ) [1], а также для параметрического преобразования частоты в различные спектральные диапазоны [2]. Квазисинхронная генерация волны разностной частоты при коллинеарном распространении двух световых волн в кристалле с ПДС позволяет получить преобразование в излучение ТГц диапазона с использованием ниобата лития [3], а также при его синхронной генерации в симметричной волноводной структуре [4].

В данном сообщении представлены результаты теоретического анализа и оценка эффективности генерации волн терагерцевого диапазона при нелинейном преобразовании света на планарных ПДС в симметричной щелевой волноводной структуре, состоящей из двух пластин ниобата лития.

Нами рассмотрена квазисинхронная генерации ТГц излучения в симметричной щелевой волноводной структуре, состоящей из пластин с планарными волноводами  $\text{Ti:LiNbO}_3$   $Y$ -среза (в которых сформированы ПДС с необходимым периодом), параметры которых соответствуют приведенным в работе [5], разделенных воздушным зазором  $a$  и имеющих толщину  $b$  (рис. 1). Предполагалось, что световые волны с длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  распространяются как ТЕ-моды в планарных волноводах в направлении оси  $x$ , генерируя на ПДС моду ТЕ<sub>0</sub> рассматриваемой симметричной структуры, с разностной частотой, соответствующей ТГц диапазону.

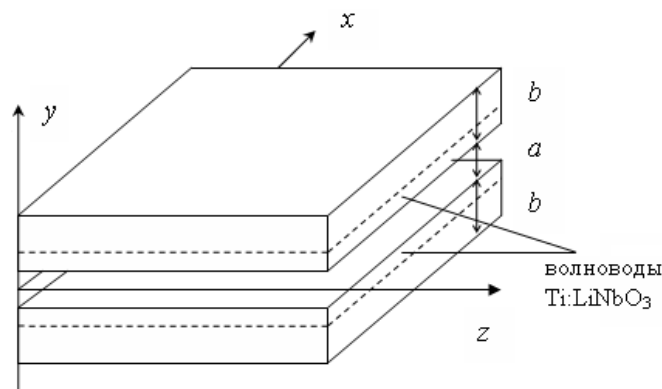


Рис.1. Симметричная щелевая волноводная структура для излучения ТГц диапазона, состоящая из двух пластин ниобата лития, содержащих оптические волноводы Ti:LiNbO<sub>3</sub>

На рис. 2 представлено нормированное на единичную амплитуду при  $y = 0$  поперечное распределение светового поля  $E_{3z}(y)$  для моды TE<sub>0</sub>, возбуждаемой на частоте 1 ТГц ( $\lambda_{THz}=300$  мкм) в структуре с пластинами, имеющими толщину  $b = 30$  мкм.

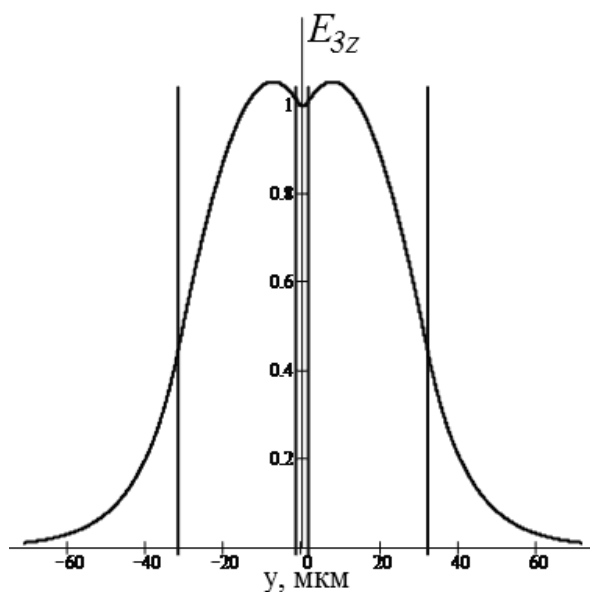


Рис.2. Распределение электромагнитного поля для моды TE<sub>0</sub>, возбуждаемой на частоте 1 ТГц в щелевой симметричной структуре (рис. 1) с пластинами из ниобата лития Y-среза, имеющими толщину  $b = 30$  мкм и разделенными воздушным зазором  $a = 3$  мкм. Вертикальные линии соответствуют границам пластин ниобата лития.

Из рис. 2 следует, что вблизи границ пластин, на которых находятся титан-диффузионные волноводы, значения ТГц поля близки к максимальным. Таким образом, в рассматриваемой щелевой симметричной структуре достигается концентрация светового поля, позволяющая увеличить эффективность преобразования оптических волн накачки в излучение ТГц диапазона.

Оптические волноводы, которые могут быть сформированы диффузией титана в обоих, или в одной из пластин, не оказывают существенного влияния на распространение излучение ТГц диапазона. Использование известного волнового уравнения позволило нам получить дисперсионное уравнение для четных и нечетных ТЕ мод, а также поперечное распределение светового поля для четных ТЕ мод в рассматриваемой структуре.

Эффективность преобразования в излучение ТГц диапазона в волноводных структурах определяется интегралом перекрытия полей взаимодействующих волноводных мод и выполнением условий синхронизма. Нами получены соотношения для расчета эффективности нелинейного преобразования  $\eta = P_{\text{THz}} / (P_1 P_2)$ , соответствующие одномодовому возбуждению оптических и ТГц волноводов, обеспечивающему взаимодействие двух волн оптического диапазона (с мощностями  $P_1$  и  $P_2$ ) в рассматриваемой структуре. Расчеты показали, что для структуры с пластинами, имеющими толщину 30 мкм, эффективность составляет  $1.20 \times 10^{-9} \text{ Вт}^{-1}$ . При аналогичных расчетах для структуры с волноводными пластинами с толщиной 15 мкм, эффективность увеличивается до значения  $\eta = 3.11 \times 10^{-9} \text{ Вт}^{-1}$ . В расчетах ширина световых пучков вдоль оси  $z$  принималась равной 100 мкм, длина взаимодействия  $L = 10 \text{ мм}$ .

Работа выполнена при поддержке АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы», ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2010-2014 годы» (гос. контракт № 02.740.11.0553) и гранта РФФИ № 09-02-00609\_a.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. M. Houe, P.D. Townsend // J. Phys. D: Appl. Phys. 1995. V. 28. P. 1747–1763.
2. L.I. Myers, R.C. Eckardt, M.M. Fejer, R.L. Byer, W.R. Bosenberg, J.W. Pierce // J. Opt. Soc. Am. B. 1995. V. 12. P. 2102–2116.
3. G. Kh. Kitaeva // Laser Phys. Lett. 2008. V. 5. P. 559-576.
4. Chad Staus, Thomas Kuech, and Leon McCaughan // Opt. Express. 2008. V. 16. №. 17. P. 13296.
5. Коханчик Л.С., Бородин М.В., Шандаров С.М., Буримов Н.И., Щербина В.В, Волк Т.Р. // ФТТ. 2010. Т. 52. В. 8. С. 1602-1609.