

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твердого тела

**Формирование дефектной моды и особенности распределения
электрического поля СВЧ волны в одномерном фотонном кристалле**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса

по направлению 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

факультета nano- и биомедицинских технологий

Агейкина Никиты Алексеевича

Научные руководители

профессор, д.ф.-.м.н.

А.В. Скрипаль

доцент, к.ф.-.м.н.

Д. В. Пономарев

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-.м.н.

Д.А. Усанов

Введение

Природные материалы хорошо изучены и давно используются. Искусственное изменение структуры материалов позволяет получить у модифицированного объекта новые свойства, относительно природных объектов. К таким искусственно построенным материалам относятся метаматериалы. Метаматериал — это искусственно созданные гетерогенные среды, в которых геометрические размеры, а также электрофизические параметры составляющих элементов периодически изменяются вдоль одного или нескольких пространственных направлений. Искусственная периодическая структура модифицирует диэлектрическую и магнитную проницаемости исходного материала. Метаматериалы обладают уникальными электрофизическими, радиофизическими и оптическими свойствами, отсутствующими в природных материалах. Применения метаматериалов охватывают области, в которых используется электромагнитное излучение – военная промышленность, космические системы, медицина. Фотонные кристаллы используются в качестве фильтров, резонаторов, усилителей.

Подклассом метаматериалов являются фотонные кристаллы. Изменяя параметры периодичности и создаваемых нарушений фотонных кристаллов, можно осуществлять управление шириной и глубиной фотонной запрещенной зоны, а также частотными положениями «окон прозрачности».

Исследование взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ диапазона с фотонными кристаллами является актуальным.

Целью бакалаврской работы являлось выявление особенностей распределения напряженности электрического поля одномерного волноводного фотонного кристалла, в случае наличия нарушения периодичности структуры.

Для достижения этой цели:

- при помощи системы автоматизированного проектирования High Frequency Structural Simulator (HFSS) выполнено компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик и распределение амплитуды напряженности электрического поля одномерных волноводных фотонных кристаллов в СВЧ-диапазоне
- проведено экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик фотонных кристаллов, а также их сравнение с результатами компьютерного моделирования

Выпускная квалификационная работа содержит 3 главы:

- 1) КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ
- 2) РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОДОМЕРНОГО ВОЛНОВОДНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛА С ЭЛКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНОЙ СВЧ ДИАПАЗОНА
- 3) РЕЗУЛЬТАТЫ ЭПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АМПЛИТУДЫ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ СВЧ ВОЛНЫ В ОДНОМЕРНОМ ВОЛНОВОДНОМ ФОТОННОМ КРИСТАЛЛЕ

Результаты компьютерного моделирования амплитудно-частотных характеристик одномерных волноводных фотонных кристаллов

Для теоретического исследования были выбраны следующие модели одномерных волноводных фотонных кристаллов:

1. 7-слойная структура, состоящая из чередующихся нечетных слоёв фторопласта размером 23x10x4.15 мм (диэлектрическая проницаемость $\epsilon=2$) и чётных слоев воздуха размером 23x10x9 мм (диэлектрическая проницаемость $\epsilon=1$). Все слои полностью заполняли поперечное сечение волновода. Фторопласт имел продольный вырез для перемещения зонда вдоль фотонного кристалла. Вырез имел размеры 1x1x4.15 мм. (Рис.2)
2. В одномерном волноводном фотонном кристалле, описанном в пункте 1, было сделано нарушение в центральном (четвертом) слое путем уменьшения толщины слоя до 2 мм.
3. В одномерном волноводном фотонном кристалле, описанном в пункте 1, было сделано нарушение в центральном четвертом слое путем увеличения толщины слоя до 19.5 мм
4. Также были смоделированы подобные одномерные фотонные кристаллы, представленные в пунктах 1-3, но без продольного выреза.

Исследование фотонных кристаллов по пункту 4 необходимо для сравнения и анализа влияния выреза (щели) на амплитудно-частотную характеристику и распределение напряженности электрического поля.

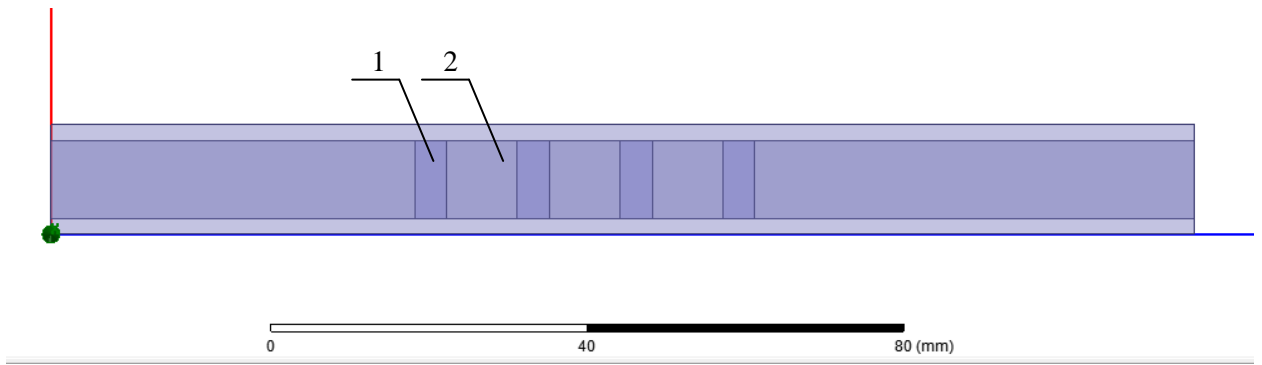


Рис.1. Одномерный волноводный фотонный кристалл: 1- слои фторопласта (диэлектрическая проницаемость $\epsilon=2$); 2- слои воздуха (диэлектрическая проницаемость $\epsilon=1$)

Вырез, в слоях фторопласта предназначался для перемещения зонда, во время измерения распределения электрического поля вышеперечисленных фотонных кристаллов (пункт 1-3).

Для теоретического расчета АЧХ электромагнитной волны и распределения поля вдоль и поперек фотонных кристаллов использовалась программа Ansoft HFSS 15. При расчете с помощью программы был использован метод конечных элементов (Finite Element Method).

Были рассчитаны теоретически амплитудно-частотные характеристики одномерных фотонных кристаллов по пунктам 1-3 . Расчет проводился в диапазоне частот 8-12 ГГц с шагом в 0,005 ГГц для фотонных кристаллов.

Выявлены резонансные частоты для каждого из фотонных кристаллов соответственно:

- 1) 9.202 ГГц с вырезом (щелью); 9.19 ГГц без выреза (щели)
- 2) 11.225 ГГц с вырезом (щелью); 11.21 ГГц без выреза (щели)
- 3) 10,89 ГГц с вырезом (щелью); 10.88 ГГц без выреза (щели)

Результаты компьютерного моделирования распределения амплитуды напряженности электрического поля для одномерных волноводных фотонных кристаллов

Во всех компьютерных моделях одномерных волноводных фотонных кристаллов (пункты 1-4) было построено распределение амплитуды напряженности электрического поля электромагнитной волны при различных фазах вдоль двух линий, направленных вдоль оси фотонного кристалла. Линии проведены от начала до конца волновода, но на разных высотах относительно широкой стенки волновода:

- Линия, проходящая вдоль центральной оси фотонного кристалла (на границе пересечения диагоналей поперечного сечения канала волновода, см. рис.2) – линия 1.
- Линия, проходящая на предполагаемой высоте, на которую будет опущен зонд в эксперименте (см. рис.2) – линия 2.

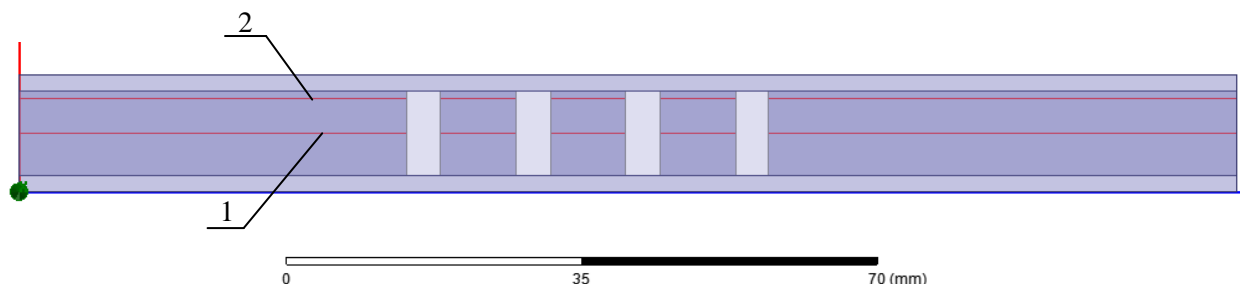


Рис.2. Расположение линий, в одномерном волноводном фотонном кристалле, вдоль которых рассчитывалось распределение напряженности электрического поля.

Результаты расчёта показали что, вырез практически не оказывает влияния на распределение электрического поля вдоль фотонного кристалла. Для случая, когда строится распределение электрического поля на уровне перемещения зонда, наблюдаются всплески на нечетных слоях, т.е. на слоях фторопласта с вырезом (щелью).

Результаты экспериментального исследования амплитудно-частотных характеристик одномерных волноводных фотонных кристаллов с разным типом нарушений

В ходе эксперимента исследовались модели одномерных волноводных фотонных кристаллов, созданные в соответствии с теоретическими моделями которые были представлены в предыдущей главе (пункты 1-3).

Для измерения амплитудно-частотной характеристики одномерных фотонных волноводных кристаллов использовался векторный анализатор цепей PNA-X Network Analyzer N5242A работающий в диапазоне 10MHz-26.5GHz. Предварительна была произведена калибровка.

Одномерные волноводные фотонные кристаллы помещались в волноводную измерительную линию P1-28. Все фотонные кристаллы были расположены на расстоянии 5 мм от зонда. Начальное положение зонда было на расстоянии 95мм относительно начала волновода, зонд опущен внутрь волновода на 0.8 мм. Размеры волновода 23x10x146 мм.

По полученным амплитудно-частотным характеристикам, представленные на рисунках 3.2-3.4, определены резонансные частоты для каждого одномерного фотонного кристалла, представленные в пунктах 1-3 соответственно: 7.488 ГГц для фотонного кристалл без нарушения; 11.241ГГц для фотонного кристалл с нарушением; 11.046 ГГц для фотонного кристалл с нарушением 19.5 мм

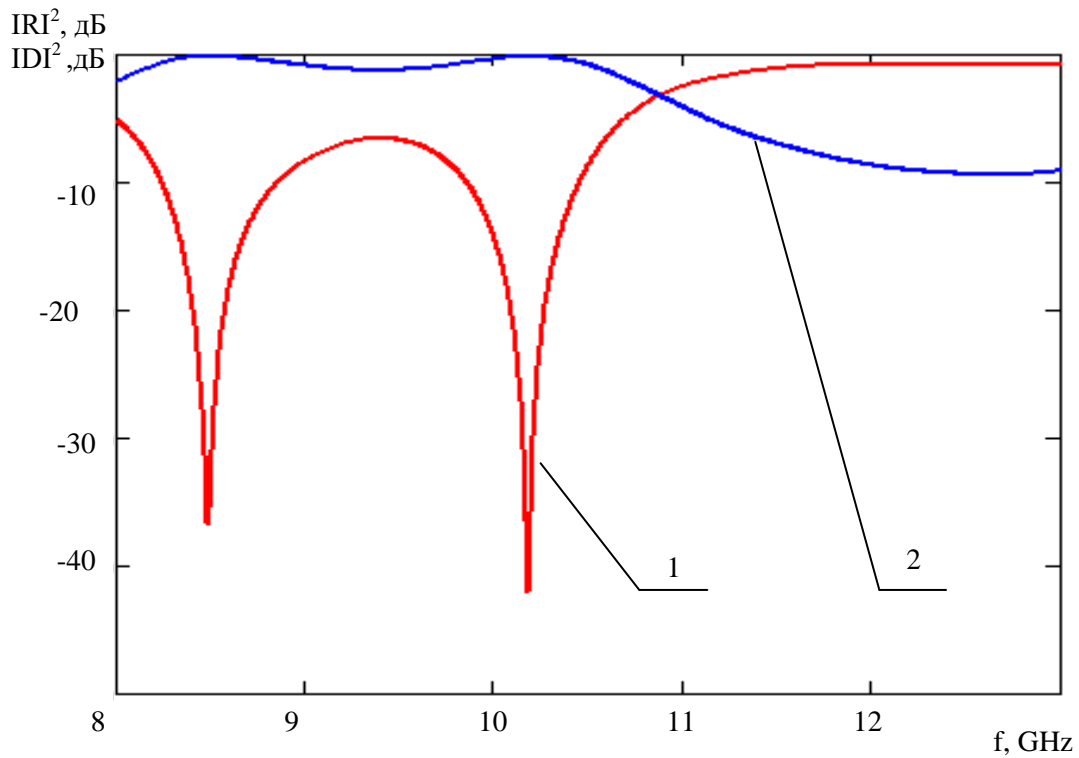


Рис.3. Экспериментальная частотная зависимость коэффициентов отражения (1) и прохождения (2) для одномерного фотонного кристалла без нарушения.

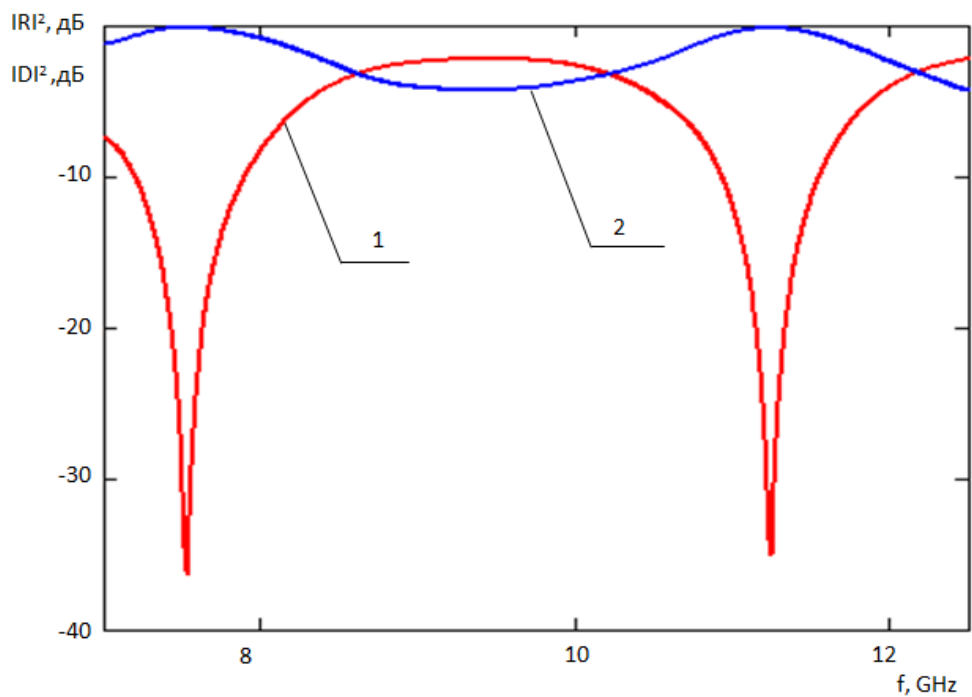


Рис.4. Экспериментальная частотная зависимость коэффициентов отражения (1) и прохождения (2) для одномерного фотонного кристалла с нарушением 2 мм в центральном четвертом слое.

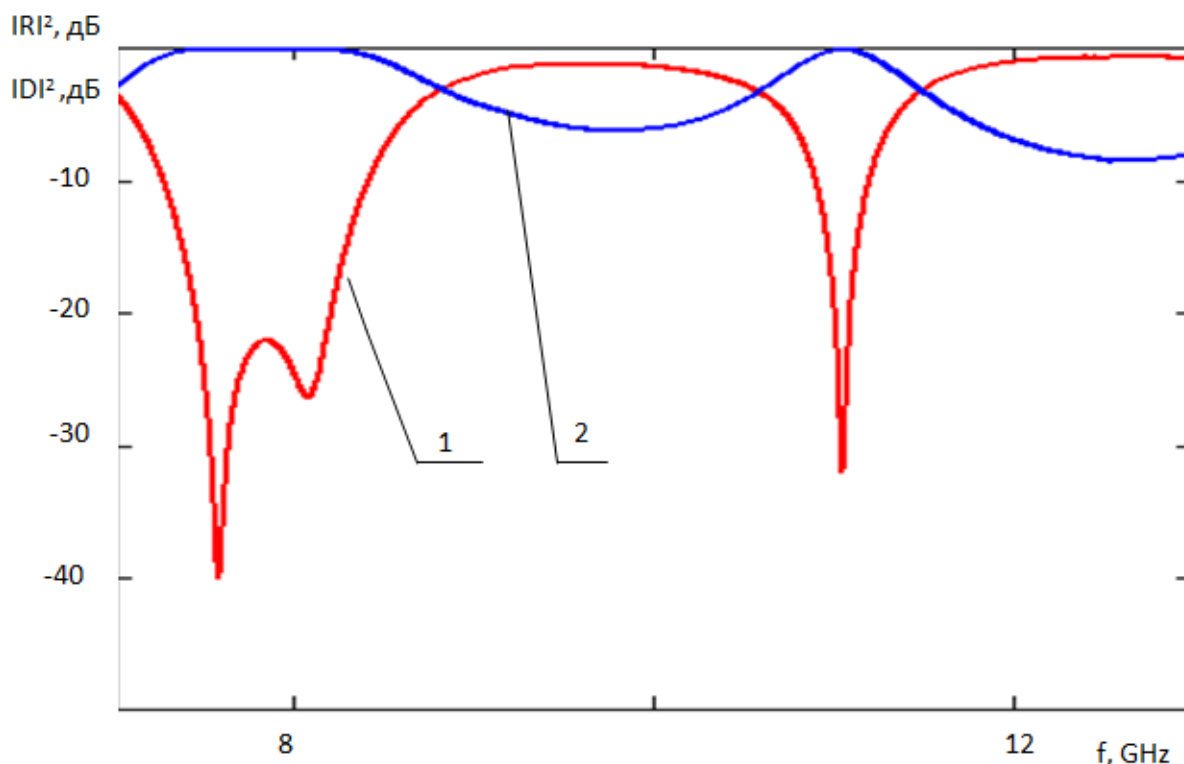


Рис.5. Экспериментальная частотная зависимость коэффициентов отражения (1) и прохождения (2) для одномерного фотонного кристалла с нарушением 19.5 мм в центральном четвертом слое.

Полученные резонансные частоты для фотонных кристаллов без нарушения, с нарушением 2мм и с нарушение 19.5 мм равны соответственно: 7.488 ГГц, 11.241 ГГц, 11.046 ГГц.

Результаты экспериментального исследования распределения амплитуда напряженности электрического поля для одномерных волноводных фотонных кристаллов с разным типом нарушений

Для измерения электромагнитного поля вдоль одномерных волноводных фотонных кристаллов использовался генератор СВЧ сигналов PSG Analog Signal Generator E8257D с частотным диапазоном 250kHz – 40GHz.

СВЧ сигнал генерировался для каждого одномерного волноводного фотонного кристалла на соответствующей ему резонансной частоте.

Амплитуда сигнала 20 dbm, частота модуляции СВЧ сигнала 500 Гц, форма сигнала синусоидальная.

Детектировалось изменение поля одномерного волноводного фотонного кристалла через каждый шаг (0,5 мм) зонда. Перемещение зонда по измерительной линии было ограничено, поэтому измерение поля происходило в диапазоне от 51 до 95 мм, вдоль длины волновода, на глубине 0.8 мм. Изменение поля детектировалось мультиметром.

Таким образом, были экспериментально исследованы особенности взаимодействия СВЧ волны с одномерными волноводными фотонными кристаллами без нарушения периодичности, а также с нарушением периодичности, путем уменьшения/увеличения его толщины в частотном диапазоне 8–12 ГГц.

Расчетные и экспериментальные данные о напряженности электрического поля продемонстрировали хорошее качественное совпадение. Однако наблюдаются искажения на всех нечетных слоях фотонных кристаллов, которые представляют собой слои фторопласта с щелью.

Заключение

В ходе выполнения бакалаврской работы была создана модель фотонного кристалла, проведено компьютерное моделирование, определены частотные характеристики коэффициентов отражения и прохождения, получены данные о напряженности электрического поля вдоль фотонного кристалла на разных высотах.

В результате проведенного компьютерного моделирования установлено, что создание нарушения периодичности в виде измененной длины центрального слоя фотонного кристалла, приводит к появлению «окна прозрачности» в запрещенной зоне одномерного волноводного фотонного кристалла.

Установлено, что при малых толщинах нарушения на пространственном распределении амплитуды электрического поля вдоль фотонного кристалла наблюдается минимум поля в координатах, соответствующих созданному нарушению периодичности, а при больших толщинах нарушения - максимум.

Также компьютерное моделирование показало, что появление щели, в слоях фторопласта одномерного фотонного кристалла, приводило к искажению распределению напряженности электрического поля вдоль фотонного кристалла относительно фотонного кристалла без наличия щели.

Проведено экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик фотонных кристаллов с различным типом нарушения. Также получены данные о распределении напряженности электрического поля вдоль фотонного кристалла. Экспериментальные данные продемонстрировали качественное совпадение с расчетом, что подтверждает факт искажающие щелью пространственного распределения электрического поля воздействие щели на поле что, что щель искажает поле фотонного кристалла.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гуляев Ю.В., Лагарьков А.Н., Никитов С.А. Метаматериалы: фундаментальные исследования и перспективы применения// Вестник Российской Академии Наук. 2008. Т. 78, № 5. С. 438–457.
2. Yablonovitch E., Gmitter T.J., Meade R.D. // Phys. Rev. Lett. 1991. V. 67. № 24. P. 3380.
3. Беляев Б. А., Волошин А. С., Шабанов В. Ф. Исследование микрополосковых моделей полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах// Докл. АН. 2005. Т. 403, №3. С.319-324.
4. Кособукин, В.А. Фотонные кристаллы// Окно в мир. №4. 2002. г.
5. Ильин В. П. Численные методы решения задач электрофизики. М.: Наука. Физматлит, 1985. С.336
6. Ozbay E., Temelkuran B., Bayindir M. Microwave applications of photonic crystals// Progress in Electromagnetics research. 2003. Vol 41. P. 185-209.
7. Dmitry Usanov, Alexander Skripal, Anton Abramov, Anton Bogolubov, Vladimir Skvortsov, Merdan Merdanov. Measurement of the Metal Nanometer Layer Parameters on Dielectric Substrates using Photonic Crystals based on the Waveguide Structures with Controlled Irregularity in the Microwave Band // Proc. of 37th European Microwave Conference. Munich, Germany. 8–12th October 2007. P. 198–201.
8. Гуляев Ю.В., Никитов С.А. Фотонные и магнитофотонные кристаллы – новая среда для передачи информации// Радиотехника. 2003. №8. С. 26–30
9. Усанов Д. А. , Скрипаль Ал. В., Рыгалин Б. Н.// Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и

биообъектами// Материалы Всероссийской научной школы-семинара.
2014. С. 16-19.