

Министерство образования и науки Российской Федерации

УДК 621.383.8, 537.86.029.65/.79

ГРНТИ 29.31.15, 29.31.29, 29.35.33, 29.31.26, 29.03.77

Инв. №

УТВЕРЖДЕНО:
Исполнитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Новосибирский национальный исследовательский государственный университет"
От имени Руководителя организации _____ / Федорук М.П./ М.П.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

о выполнении Государственного контракта
№ 16.740.11.0377 от 29 ноября 2010 г. и Дополнению от 01 сентября 2011г. №1

Исполнитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Новосибирский национальный исследовательский государственный университет"
Программа (мероприятие): Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в рамках реализации мероприятия № 1.2.1 Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук.
Проект: Разработка матричного многоспектрального детектора терагерцового излучения на новых физических принципах
Руководитель проекта: _____ /Аржанников Андрей Васильевич/ (подпись)

Новосибирск
2012 г.

Реферат

Ключевые слова: матричный приемник, болометрический приемник, терагерцовое излучение, оптическая система считывания, высокоимпедансная поверхность, резонансный поглотитель

В отчете представлены результаты исследований, выполненных согласно Государственному контракту № 16.740.11.0377 "Разработка матричного многоспектрального детектора терагерцового излучения на новых физических принципах" (шифр "2010-1.2.1-400-027") от 29 ноября 2010 по направлению "Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук в интересах развития высокотехнологичных секторов экономики" в рамках мероприятия 1.2.1 "Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук", мероприятия 1.2 "Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук и кандидатов наук", направления 1 "Стимулирование закрепления молодежи в сфере науки, образования и высоких технологий" федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы.

Цель работы – Проведение научных исследований, направленных на создание принципиально нового поколения матричных детекторов электромагнитного излучения в терагерцовом и субтерагерцовом диапазоне на основе микромеханических преобразователей терагерцового излучения и оптоэлектронной системы считывания.

Обеспечение возможности создания многоспектральных и поляризационно-селективных приемников для систем оперативной визуализации изображения в терагерцовом диапазоне, открывающих новые, недоступные ранее, возможности в исследовании взаимодействия терагерцового излучения с веществом.

Обеспечение получения научных результатов мирового уровня, формирование эффективных и жизнеспособных научных коллективов, подготовку и закрепление в сфере науки и образования научных и научно-педагогических кадров.

При проведении работ использованы следующие методики: методика расчета электродинамических характеристик ультратонких поглотителей на основе высокоимпедансных поверхностей с помощью пакета Ansoft HFSS v.12, а также с использованием аналитического подхода на базе метода эквивалентных цепей; методика расчета теплофизических характеристик ячейки опто-акустического преобразователя с помощью пакета программ COMSOL Multiphysics 3.5; метод планарной контактной фотолитографии.

Оборудование, использованное при выполнении работ, включает: компьютерный кластер НГУ, содержащий 160 узлов (servers HP BL460/BL2x220) с быстродействием 13 тераопераций с плавающей запятой в секунду; спектрометр на основе ламп обратной волны с рабочим диапазоном частот 0.1-1.5 терагерц; технологическая линейка контактной фотолитографии.

Отчет о НИР содержит:

- анализ научно-технической литературы по теме проекта и обоснование выбора направления исследования, принципов регистрации терагерцового излучения с пространственным, спектральным и поляризационным разрешением, базовых схемотехнических решений, оценку ожидаемых параметров приёмника и сравнение их с параметрами существующих изделий-аналогов;

- результаты разработки конструкции и топологического рисунка ультратонких резонансных поглотителей, обладающих разной спектральной и поляризационной чувствительностью;

- результаты разработки конструкции фильтрующих элементов для предварительной частотной фильтрации терагерцового излучения;
- результаты экспериментальных исследований параметров поглощающих слоёв и фильтрующих элементов;
- результаты разработки и изготовления многоспектральной матричной структуры опто-акустических преобразователей, экспериментальные результаты измерения параметров образцов матричных структур;
- результаты численного моделирования основных параметров приёмника терагерцового излучения;
- результаты разработки конструкции и схемотехнических решений матричного приёмника терагерцового излучения с оптической системой считывания;
- результаты исследований основных характеристик созданной модели многоспектрального приёмника терагерцового излучения;
- оценку возможности создания конкурентоспособной продукции и услуг и разработка рекомендаций по использованию результатов проведенной НИР;
- результаты проведения технико-экономической оценки полученных результатов;
- предложения по внедрению результатов НИР в образовательный процесс.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	9
1 ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	11
1.1 Анализ научно-технической литературы, нормативно-технической документации и других материалов, по теме проекта.....	11
1.1.1 Детекторы ИК излучения на основе биматериальных элементов ...	11
1.1.2 Оптико-акустические детекторы ИК излучения.....	21
1.1.3 Матричный микромеханический детектор на термо-пневматическом принципе	24
1.1.4 Исследование физико–химических процессов на границе раздела сред при изготовлении планарных структур матричных микро-механических преобразователей ИК излучения	28
1.1.5 Высокоэффективные поглотители для излучения терагерцового диапазона.....	38
1.2 Обоснование выбранного направления исследований и сравнительные характеристики ожидаемых показателей разрабатываемой продукции и существующих изделий-аналогов.....	46
1.3 Разработка методики расчета топологии ультратонких резонансных поглощающих слоев	48
2 ПРОРАБОТКА ТОПОЛОГИИ УЛЬТРАТОНКИХ РЕЗОНАНСНО-ПОГЛОЩАЮЩИХ РАБОЧИХ СЛОЕВ	50
2.1 Расчет топологии ультратонких резонансных поглощающих слоев для разных длин волн и различных направлений поляризации электромагнитной волны	50
2.2 Разработка методики предварительной частотной фильтрации терагерцового излучения	75
2.3 Расчет конструкции фильтрующих элементов.....	78
2.4 Проведение патентных исследований по ГОСТ 15.011-96	79
2.5 Изготовление лабораторных образцов ультратонких резонансных поглощающих слоев	81
2.6 Изготовление лабораторных образцов фильтрующих элементов.....	83

2.7	Разработка методики экспериментальных исследований лабораторных образцов ультратонких резонансных поглощающих слоев и фильтрующих элементов	84
2.8	Экспериментальное исследование характеристик лабораторных образцов ультратонких резонансных поглощающих слоев и фильтрующих элементов и сопоставление результатов экспериментов с результатами расчетов и математического моделирования.....	91
3	КОНСТРУИРОВАНИЕ ПОГЛОЩАЮЩЕГО СЛОЯ МАТРИЦЫ ОАП...	100
3.1	Разработка методики расчета конструкции поглощающего слоя матрицы опто-акустических преобразователей на основе разработанного на первом этапе дизайна ультратонкого резонансного поглощающего слоя	100
3.2	Расчет конструкции макета матрицы опто-акустических преобразователей, обеспечивающей много-спектральную чувствительность и поляризационную селективность приемника	103
3.3	Изготовление экспериментальных структур макета матрицы опто-акустических преобразователей	110
3.4	Разработка методики экспериментальных исследований макета матрицы опто-акустических преобразователей	112
3.5	Экспериментальное исследование макета матрицы опто-акустических преобразователей	117
3.6	Сопоставление результатов экспериментов с результатами расчетов и математического моделирования	122
4	ИЗГОТОВЛЕНИЕ МАТРИЦЫ ОПТО-АКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ	123
4.1	Разработка методики расчета конструкции и параметров модели многоспектрального поляризационно-чувствительного матричного приемника терагерцового диапазона на основе разработанного на третьем этапе матрицы опто-акустических преобразователей, обеспечивающей многоспектральную чувствительность и поляризационную селективность приемника	123
4.2	Расчет конструкции модели многоспектрального поляризационно-чувствительного матричного приемника терагерцового диапазона	132

4.3 Разработка конструкции оптической системы считывания сигнала с матрицы опто-акустических преобразователей	138
5 ИЗГОТОВЛЕНИЕ МОДЕЛИ МАТРИЧНОГО МНОГОСПЕКТРАЛЬНОГО ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ПРИЕМНИКА ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА	145
5.1 Изготовление модели многоспектрального поляризационно-чувствительного матричного приемника терагерцового диапазона	145
5.2 Разработка методики экспериментальных исследований модели многоспектрального поляризационно-чувствительного матричного приемника терагерцового диапазона	150
5.3 Экспериментальное исследование модели многоспектрального поляризационно-чувствительного матричного приемника терагерцового диапазона	154
5.4 Сопоставление результатов экспериментов с результатами расчетов и математического моделирования	161
5.5 Оценка возможности создания конкурентоспособной продукции и услуг и разработка рекомендаций по использованию результатов проведенных НИР	162
5.6 Проведение технико-экономической оценки полученных результатов	163
5.7 Разработка программы внедрения результатов НИР в образовательный процесс	163
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	164
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	166
ПРИЛОЖЕНИЕ А.	169
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.	170
ПРИЛОЖЕНИЕ В.	171
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.	172
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.	173
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.	174

ВВЕДЕНИЕ

Данная работа посвящена созданию нового типа матричного приёмка терагерцового излучения, основанного на термопневматическом преобразователе. В термопневматическом преобразователе энергия падающей электромагнитной волны преобразуется во внутреннюю энергию газа, находящегося в замкнутом объёме. Увеличение внутренней энергии газа (температуры) приводит к деформации стенки замкнутого объёма, представляющую собой гибкую мембрану с зеркальным покрытием. Величину деформации регистрирую оптическим дифференциально-поляризационным методом, поэтому Термопневматический преобразователь называют ещё оптико-акустическим преобразователем. Именно это определение используется в дано отчёте. Одним из ключевых элементов приёмника является ультратонкий резонансный поглотитель, представляющий собой токую диэлектрическую плёнку, толщиной много меньше рабочей длины волны терагерцового излучения, покрытую с двух сторон тонкими слоями хорошо проводящего материала (например, алюминия). На одной стороне плёнки в металле методом контактной фотолитографии изготавливается специально рассчитанный рисунок, топология которого определяет резонансную частоту поглощения и поляризационную чувствительность коэффициента поглощения. Малая толщина поглотителя (несколько микрон), размещённого внутри ячейки опто-акустического преобразователя, обеспечивает малую теплоёмкость преобразователя и, тем самым, высокую чувствительность и малое время отклика. Другим преимуществом ультратонкого поглотителя является то, что на одной плёнке могут быть изготовлены фрагменты поглотителей, обладающих разной спектральной и поляризационной чувствительностью, что даёт возможность создания целого ряда детекторов, работающих на одном принципе. Возможно создание как монохроматических, так и

многоспектральных матричных детекторов для регистрации изображения на одной или одновременно на нескольких частотах. Использование фрагментов поглотителей с разными резонансными частотами на одной полке позволяет изготовить компактный спектрофотометр, работающий в параллельном режиме. Использование трёх односпектральных фрагментов поглотителей с анизотропным коэффициентом поглощения при соответствующей относительной ориентации позволит создавать компактные спектрофотометры на заданную рабочую частоту терагерцового излучения.

В первом разделе отчёта приведён анализ научно-технической литературы по теме проекта и обоснование выбора направления исследования, принципов регистрации терагерцового излучения с пространственным, спектральным и поляризационным разрешением, анализ базовых схемотехнических решений, оценка ожидаемых параметров приёмника и сравнение их с параметрами существующих изделий-аналогов.

Во втором разделе приведены результаты разработки конструкции и топологического рисунка ультратонких резонансных поглотителей, обладающих разной спектральной и поляризационной чувствительностью.

В третьем разделе приведены результаты разработки и изготовления многоспектральной матричной структуры опто-акустических преобразователей, экспериментальные результаты измерения параметров образцов матричных структур.

В четвертом разделе приведены результаты разработки конструкции и схемотехнических решений матричного приёмника терагерцового излучения с оптической системой считывания.

В пятом разделе приведены результаты разработки конструкции и схемотехнических решений матричного приёмника терагерцового излучения с оптической системой считывания и предложения по дальнейшему использованию результатов НИР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения работ по настоящей НИР можно заключить следующее.

1. Проведён анализ научно-технической литературы, нормативно-технической документации и других материалов, по теме проекта.

2. Обосновано выбранное направления исследований, проведено сравнение характеристик ожидаемых показателей разрабатываемой продукции и существующих изделий-аналогов.

3. Разработана методика расчета топологии ультратонких резонансных поглощающих слоев.

4. Рассчитана топология ультратонких резонансных поглощающих слоев для разных длин волн и различных направлений поляризации электромагнитной волны.

5. Разработана методика предварительной частотной фильтрации терагерцового излучения и конструкция фильтрующих элементов.

6. Проведено патентное исследование по ГОСТ 15.011-96.

7. Изготовлены лабораторные образцы ультратонких резонансных поглощающих слоев и фильтрующих элементов.

8. Разработана методика экспериментальных исследований лабораторных образцов ультратонких резонансных поглощающих слоев и фильтрующих элементов.

9. Экспериментально исследованы характеристики лабораторных образцов ультратонких резонансных поглощающих слоев и фильтрующих элементов и проведено сопоставление результатов экспериментов с результатами расчетов и математического моделирования.

10. Рассчитана конструкция макета матрицы опто-акустических преобразователей, обеспечивающая много-спектральную чувствительность и поляризационную селективность приемника.

11. Изготовлены экспериментальные структуры макета матрицы опто-акустических преобразователей.

12. Экспериментально исследованы макеты матрицы опто-акустических преобразователей и проведено сопоставление результатов экспериментов с результатами расчетов и математического моделирования.

13. Рассчитана конструкция модели многоспектрального поляризационно-чувствительного матричного приемника терагерцового диапазона и разработана конструкция оптической системы считывания сигнала с матрицы опто-акустических преобразователей.

14. Изготовлена модель многоспектрального поляризационно-чувствительного матричного приемника терагерцового диапазона.

15. Проведено экспериментальное исследование модели многоспектрального поляризационно-чувствительного матричного приемника терагерцового диапазона и сопоставлены результаты экспериментов с результатами расчетов и математического моделирования.

16. Проведена оценка возможности создания конкурентоспособной продукции и услуг и разработаны рекомендации по использованию результатов проведенных НИР.

17. Проведена технико-экономическая оценка полученных результатов.

18. Разработана программа внедрения результатов НИР в образовательный процесс.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. R. Amantea; C. M. Knoedler; F. P. Pantuso; V. Patel; D. J. Sauer; J. R. Tower Uncooled IR imager with 5mK NEDT, Proceedings of SPIE, Vol. 3061. pp. 210-220, 1997.
2. Андреев Л.Е. Упругие элементы приборов,-М., Машиностроение, 1981, с 124.
3. T. Ishizuya; J. Suzuki; K. Akagawa; Tsuneyuki Kazama, Optically Readable Bi-material Infrared Detector, Proceedings of SPIE, Vol. 4369. pp 342-349, 2001.
4. S.R.Manalis et al.: “Two-dimensional micromechanical bimorph arrays for detection of thermal radiation “, Appl. Phys. Lett., 70, 24, pp.3311-3313, 1997.
5. Norton et al. : “ Micro-optomechanical infrared receiver with optical readout-MIRROR“, Proc. SPIE, Vol. 4028, pp.72-78, 2000.
6. Bell F.F. Phyl. Mag. Vol. 11, pp.510-528, 1881.
7. Tyndall J. Proc. Roy. Soc. London. Vol.31.- pp.3-7-317, 1881
8. Семенова О.И., Горохов Е.Б., Носков А.Г. и др. Поверхность, физики, химия, механика, т.10.11, с.102-110, 1992.
9. Таблицы физических величин» под редакцией И.С. Григорьева, Е.З.Мейлихова, Москва, «ЭНЕРГОИЗДАТ».1991.
10. K. Danaie, A. Bosseboeuf, C. Clere, C. Gousset, G. Julie, Sensors and Actuators, A99, p. 78-81, 2002.
11. C.A. Balanis (Ed.), Modern antenna handbook, NY: Wiley, 2008.
12. N. Engheta, R.W. Ziolkowski (Eds.), Electromagnetic Metamaterials: Physics and Engineering Explorations, Wiley and IEEE Press, 2006.
13. Патент RU № 2379800 от 25.07.2007.
14. К.Р. Симовский, А.А. Сочава, И.В. Мельчакова «Поверхность с высоким импедансом и стабильным низкочастотным резонансом». Радиотехника и электроника, Том 53, №5. с.527-536, 2008.
15. D. M. Pozar, Microwave engineering, NY: Wiley, 1998.

16. F. Yang, Y. Rahmat-Samii, *Electromagnetic Band Gap Structures in Antenna Engineering*, Cambridge University Press, 2009.
17. A. Harvey, "Periodic and guiding structures at microwave frequencies," *IRE Trans.*, vol. 8, pp. 30–61, June 1959.
18. P.-S. Kildal, "Artificially soft and hard surfaces in electromagnetics," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 38, pp. 1537–1544, June 1990.
19. S. Lee and W. Jones, "Surface waves on two-dimensional corrugated surfaces," *Radio Sci.*, vol. 6, pp. 811–818, Aug. 1971.
20. Munk B. *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design*, NY: Wiley. 2000.
21. D. J. Kern and D. H. Werner, A genetic algorithm approach to the design of ultra-thin electromagnetic bandgap absorbers, *Microw. Opt. Tech. Lett.*, vol. 38, no. 1, pp. 61-64, 2003.
22. S. A. Tretyakov and S. I. Maslovski, Thin absorbing structure for all incident angles based on the use of a high-impedance surface, *Microw. Opt. Tech. Lett.*, vol. 38, no. 3, pp. 175-178, 2003.
23. J. McVay, A. Hoorfar, and N. Engheta, Thin Absorbers Using Space-Filling-Curve Artificial Magnetic Conductors, *Microw. Opt. Tech. Lett.*, Vol. 51, No. 3, pp. 785-790.
24. Hu Tao, C. M. Bingham, A. C. Strikwerda, D. Pilon, D. Shrekenhamer, N. I. Landy, K. Fan, X. Zhang, W. J. Padilla, and R. D. Averitt, Highly flexible wide angle of incidence terahertz metamaterial absorber: Design, fabrication, and characterization, *Phys. Rev. B*, vol. 78, Iss. 24, pp. 241103-1-4, 2008.
25. Pyroelectric Array Cameras: Pyrocam™ III Series, SPIRICON, Member of the Ophir Group. www.ophiropt.com / www.spiricon.com.
26. M.A.Dem'yanenko, D.G. Esaev, B.A.Knyazev, G.N.Kulipanov, N.A. Vinokurov. *Appl. Phys.Lett.*, Vol.92, 131116, 2008.
27. *Spectroscopic techniques for far infra-red, submillimetre and millimeter waves.* (editor D.H.Martin), North-Holland publishing company, Amsterdam, 1967.

28. On-line information: www.ansoft.com.
29. S. A. Kuznetsov, A. V. Arzhannikov, V. V. Kubarev et al., "Development and Characterization of Quasi-Optical Mesh Filters and Metastructures for Subterahertz and Terahertz Applications". *Key Engineering Materials*, vol. 437, pp. 276-280, 2010.
30. K. J. Vinoy, R, M, Jha, *Radar absorbing materials: from theory to design and characterization*, Kluwer Academic Publishers 1996.
31. Патент US № 7,045,784 от 18.12.2003.
32. X. Liu, T. Starr, A. F. Starr, and W. J. Padilla, Infrared spatial and frequency selective metamaterial with near-unity absorbance, *Phys. Rev. Lett.* 104, 207403 (2010)].
33. K. M. Yemelyanov, S.-S. Lin, E. N. Pugh, Jr., N. Engheta, *Applied Optics*, special issue on "Polarization Imaging and Remote Sensing," 45, 5504 (2006).
34. V. N. Fedorinin, A. G. Paulish, *Measurement Science and Technology*, 2010, vol. 21, N5, 054015, 5pp.
35. Rogalski, A. *Infrared Detectors; Electrocomponent Science Monographs; Gordon and Breach Science Publishers: Singapore, 2000, Vol. 10.*
36. Справочник машиностроителя (под ред. С. В. Серенсена), т.3, Машгиз:М, 1962.