

Экспериментальное изучение спектральных характеристик открытых резонансных систем для радиоспектроскопии

1. Экспериментальное изучение спектральных, полевых, энергетических и поляризационных характеристик открытых резонансных систем

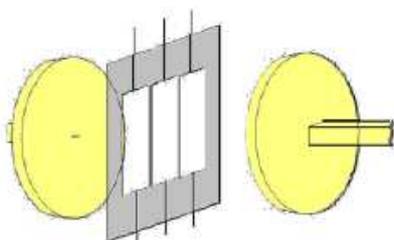
Ответственные: Деркач В. Н. (к.ф.-м.н.), Головащенко Р. В. (к.ф.-м.н.), Плевако А. С.

Результаты исследований

1.1. Открытые резонаторы

На основе изучения свойств открытых двухзеркальных резонаторов (ОР) разработаны и созданы:

- резонансные ячейки для радиоспектрометров и систем накачки поляризованных ядерных мишеней;
- дифференциальный метод измерения параметров жидких диэлектриков.



$$\varepsilon' \approx \varepsilon_k + \frac{3\sqrt{\pi}\Delta L}{h_k^2 e^{(-\frac{\pi}{2})} (1+2\xi^2)}$$

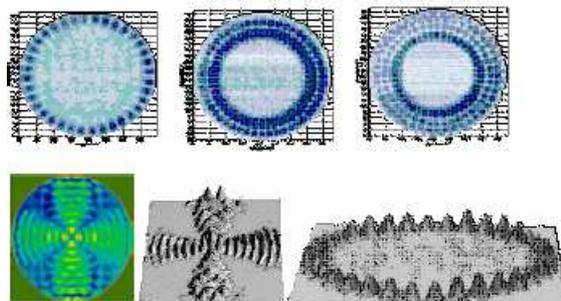
$$\operatorname{tg} \delta \approx \operatorname{tg} \delta_k \left[1 + \frac{(\Delta L - \Delta l) 3\sqrt{\pi}}{h_k^2 e^{(-\frac{\pi}{2})} (1+2\xi^2) \varepsilon_k' - \Delta L} \right]$$



1.2. Открытые бочкообразные резонаторы

На основе изучения свойств открытых бочкообразных резонаторов (ОБР) разработаны и созданы:

- многоканальные резонансные ячейки для диагностики плазменно-пучковых систем;
- влагомеры бумажной ленты, газообразных и сыпучих сред.



1.3. Открытые дисковые диэлектрические резонаторы на модах шепчущей галереи

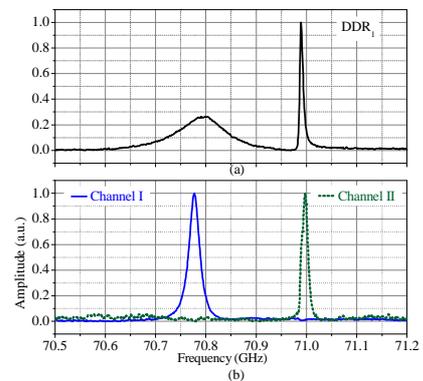
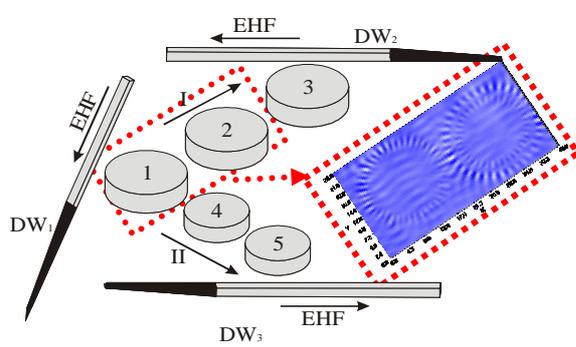
Экспериментально исследованы основные свойства многомодовых дисковых диэлектрических резонаторов (ДДР), работающих на модах шепчущей галереи (МШГ). На их основе разработаны резонансные ячейки для низкотемпературного радиоспектрометра и кюветы для диэлектрических измерений.

Из радиопрозрачных материалов (кварц, лейкосапфир, CVD диамант и др.) изготовлены с оптической точностью дисковые диэлектрические резонаторы (ДДР) и исследованы их спектральные, полевые и энергетические характеристики. Результаты использованы для решения практических задач.



1.4.Связанные дисковые диэлектрические резонаторы. Управляемые структуры на основе связанных ДДР

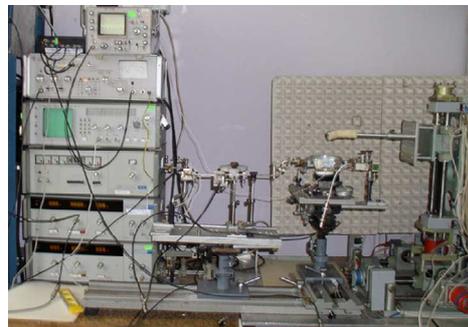
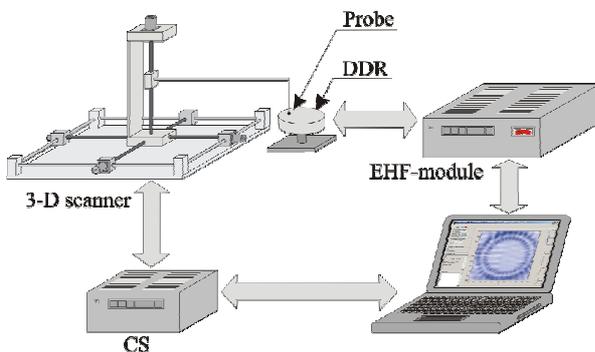
Показана возможность создания управляемых структур на основе связанных дисковых диэлектрических резонаторов (ДДР) в миллиметровом диапазоне волн. Продемонстрирована работа двухканального селективного разветвителя.



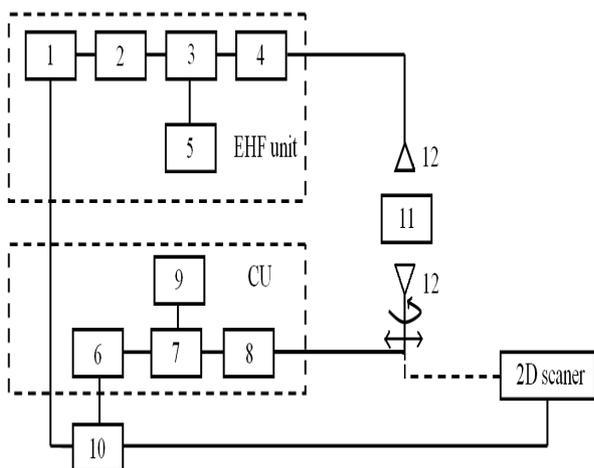
Экспериментальное оборудование

Компьютеризированные экспериментальные стенды для исследования характеристик ОР и полей дифракции в миллиметровом диапазоне длин волн:

- Компьютеризированный стенд: 3-х координатное сканирующее устройство позволяет перемещать пассивный (активный) зонд в объеме $250 \times 250 \times 250 \text{ мм}^3$ с минимальным шагом 0.1 мм и максимальной скоростью 5 мм/с по произвольной траектории, задаваемой программно. Используется для измерения спектральных, полевых, энергетических характеристик ОР в гигагерцевом диапазоне частот.



- Компьютеризированный стенд для измерения пространственных характеристик полей рассеяния волн миллиметрового диапазона на фрактальных и плоско-киральных резонансных структурах в свободном пространстве.



На основе ДДР разработаны резонансные ячейки для криогенного радиоспектрометра “ТОРНАДО”, сверхнизкотемпературного радиоспектрометра квантовых жидкостей и кюветы для измерения параметров жидких диэлектриков.

Подробное изложение результатов представлено в публикациях:

1. V.N. Derkach., O.Ye. Marykivsky. Development of microwave moisture meter for free-flowing materials. Telecommunications and Radio Engineering, vol. 51, no. 6-7, 1997, pp. 167-170.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v51.i6-7.270>
2. V.N. Derkach. Periscopic pumping systems for polarized proton target. Proceedings of the International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications. (ICEAA'99). Sept. 13-17 1999, Torino, Italy, p. 497-500.
3. V.N. Derkach, R.V. Golovashchenko, A.S. Plevako. Investigation of field distribution in open resonators using three-coordinate scanner 2002. 12th International Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2002). Conference Proceedings. September 9-13, 2002. Sevastopol, Crimea, Ukraine. ISBN: 966-7968-12-X. IEEE Catalog Number: 02EX570. - Sevastopol: "Weber", 2002, pp. 548-549.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/CRMICO.2002.1137350>
4. V. N. Derkach, R. V. Golovashchenko, Ye. V. Goroshko. Coupled disk dielectric resonators with whispering gallery modes in the millimeter-wave band. Telecommunications and Radio Engineering, 2010, Vol. 69, No. 6, pp. 481-488.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v69.i6.20>
5. V. N. Derkach, R. V. Golovashchenko, E. V. Goroshko, V. G. Korzh. Millimeter waves controlled elements on the basis of disk dielectric resonators. Proceedings of the 18th International Conference on Microwave Radar and Wireless Communications (MIKON'2010), Vilnius, Lithuania, 14-16 June 2010, pp. 384-387.
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5540627>
6. V. N. Derkach R.V.Golovashchenko, O.V. Goroshko, V.G. Korzh, S.V.Nedukh, O.S.Plevako, S.I.Tarapov. Application of Whispering Gallery Resonators for Cryogenic Measurements of Low Loss Dielectrics at Millimeter Waves. Proceedings of the 10th International Symposium on Microwave and Optical Technology, ISMOT-2005, Fukuoka Institute of Technology, Fukuoka, Japan, August 22-25, 2005, pp. 700-703.
7. R.V. Golovashchenko, O.V. Goroshko, A.V.Varavin, A.S. Plevako, V.N. Derkach. Hardware and software complex for mm-wave spectroscopic research. 16th Int. Crimean Conference

“Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2006), September 11-15, 2006, Sevastopol, Crimea, Ukraine, Conference Proceedings, Sevastopol, Weber Publishing Co., 2006, pp. 817-818.

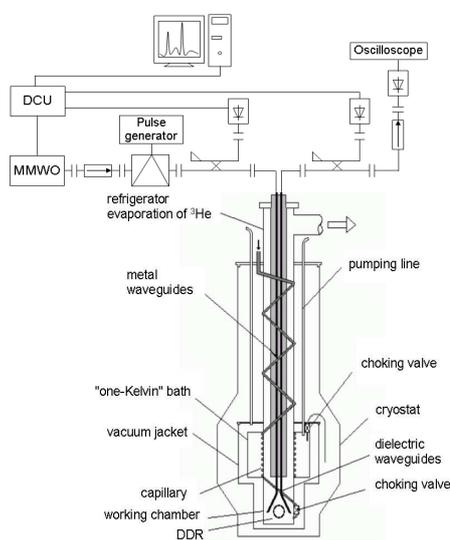
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/CRMICO.2006.256215>

2. Диэлектрометрия слабопоглощающих полупроводниковых и диэлектрических материалов в диапазоне температур $0,5 \text{ K} < T < 300 \text{ K}$

Ответственные: Деркач В. Н. (к.ф.-м.н.), Головащенко Р. В. (к.ф.-м.н.), Тарапов С. И. (чл.-корр. НАН Украины), Недух С. В. (к.ф.-м.н.), Острижной Е. М.

Методика и оборудование

Криогенный комплекс для радиоспектроскопических измерений – криодиэлектрометр “ТОРНАДО” – предназначен для проведения низкотемпературных измерений диэлектрических параметров материалов с малыми потерями в миллиметровом диапазоне длин волн и интервале температур $0,5 \div 300 \text{ K}$. Криодиэлектрометр функционально является составляющим элементом научного объекта “Национальное достояние Украины” <http://www.ire.kharkov.ua/national-treasure.html>



Параметры криогенного радиоспектрометра:

- диапазон частот – 60 ГГц – 150 ГГц;
- метод измерения – резонаторный (дисковый диэлектрический резонатор (DDR) на модах шепчущей галереи (МШГ));
- интервал температур – 0,8 К – 300 К (^4He), 0,5 – 300 К (^3He);
- система охлаждения – “Top-loading” рефрижератор с циркуляцией ^4He или ^3He ;
- объем рабочей камеры 50 см^3 .

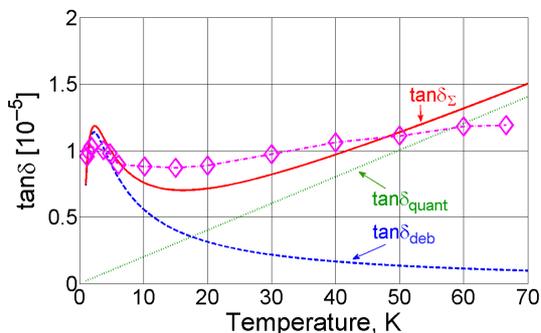


Модули радиоспектрометра: измерительные и калибровочные

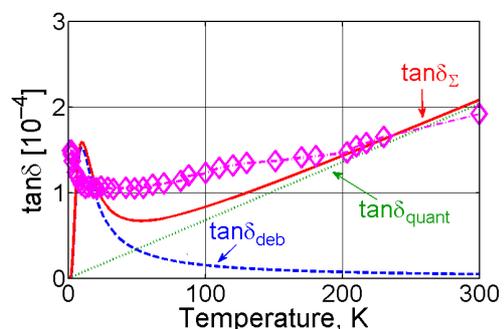
Основные результаты

2.1. В широком диапазоне частот (60 – 150 ГГц) и температур (0.5 – 300 К) впервые измерены электрофизические параметры таких материалов как: полупроводники: Si, Ge, GaP, InP, GaAs; другие алмазоподобные материалы

На основании полученных экспериментальных данных проведен анализ механизмов диэлектрических потерь для алмазоподобных структур и выделен вклад основных механизмов потерь в СВЧ-диапазоне. На приведенных графиках показаны аппроксимационные зависимости ($\tan \delta_{\Sigma}$), описывающие экспериментально зарегистрированные потери (точки-ромбы), обусловленные многоквантовым механизмом собственных потерь ($\tan \delta_{\text{quant}}$) и дебаевским механизмом несобственных потерь ($\tan \delta_{\text{deb}}$) для образцов InP и CVD алмаза.



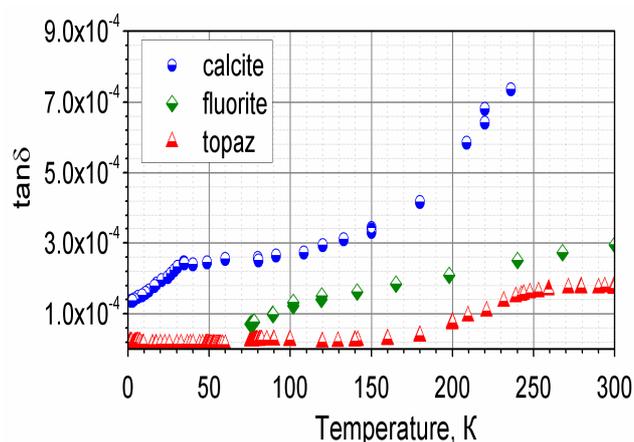
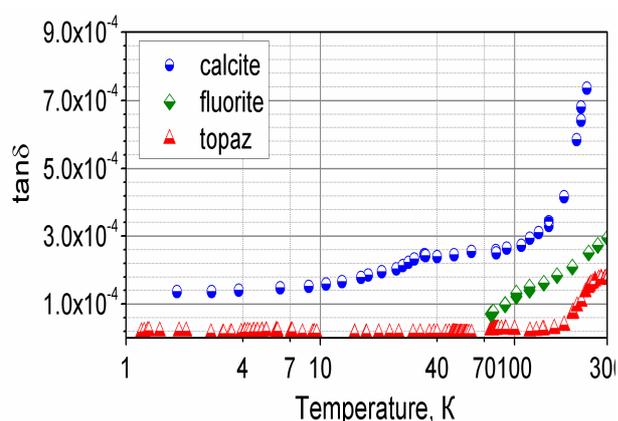
а)



б)

Зависимость тангенса угла потерь InP на частоте $f = 78$ ГГц (а) и CVD-алмаза ИОФ РАН на частоте $f = 112$ ГГц (б) от температуры

2.2. С использованием метода дискового диэлектрического резонатора на модах шепчущей галереи измерены температурные зависимости тангенса угла потерь ряда природных радиопрозрачных материалов (топаз, агат, хризопраз, жадеит, родонит, кальцит, флюорит, сердолик, халцедон и др.) Как видно из рисунка, для некоторых минералов данные зависимости имеют немонотонный характер, что, предположительно, обусловлено конкуренцией механизмов потерь энергии, характерной для композитных диэлектриков со сложной структурой. Продемонстрирована уникальность характеристик топаза, связанная с малым уровнем потерь, по величине приближающимся к потерям в искусственных кристаллических материалах.



Температурные зависимости тангенса угла потерь для некоторых природных минералов с малыми потерями (эксперимент)

2.3. Разработанные дисковые диэлектрические резонаторы и методика измерения с их помощью поглощения электромагнитной энергии в среде, окружающей ДДР, позволили продемонстрировать взаимодействие электромагнитного поля с элементарными возбуждениями в сверхтекучем гелии [5,6]

Подробное изложение результатов представлено в публикациях:

1. V. N. Derkach, Yu. F. Filippov, A. S. Plevako, Yu. V. Prokopenko, T. A. Smirnova, "Determination of microwave parameters of isotropic mediums by using an open quasi-optical spherical resonator", International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2004, Vol. 25, Issue 1, pp 139–148.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1023/B:IJIM.0000012769.99375.b6>
2. N. Derkach, R. V. Golovashchenko, S.V. Nedukh, O. S.Plevako, S. I. Tarapov, "Using of the millimeter wave dielectrometer for study of liquid helium dynamic characteristics", 15th Int. Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2005), September 12–16, 2005, Sevastopol, Crimea, Ukraine, Conference Proceedings, Sevastopol, Weber Publishing Co., 2005, pp. 836–837.
URL: <http://dx.doi.org/10.1109/CRMICO.2005.1565162>
3. B.M. Garin, V.I. Polyakov, A.I. Rukovishnikov, L.A. Avdeeva, V.N. Derkach, V.V. Parshin, V.G. Ralchenko, "Dielectric loss and energy distribution of the shallow levels in CVD diamonds", Diamond & Related Materials, 2006, Vol. 15, No. 11–12, pp. 1917–1920.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.diamond.2006.08.023>
4. V.N. Derkach, T.V. Bagmut, R.V. Golovashchenko, V.G. Korzh, , S.V. Nedukh, S. I. Tarapov, "A circular-disk dielectric resonator for low-temperature magnetic resonance measurements at millimeter and sub-millimeter wavelengths", Telecommunications and Radio Engineering, 2008, Vol. 67, No. 14, pp. 1239–1245.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v67.i14.20>
5. A. Rybalko, S. Rubets, E. Rudavskii, V. Tikhii, S. Tarapov, R. Golovashchenko, V. Derkach, "Resonance absorption of microwaves in He II: Evidence for roton emission", Physical Review B, 2007, V. 76, No. 14, paper 140503, 4 pages.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.76.140503>
6. A. S. Rybalko, S. P. Rubets, É. Ya. Rudavskii, V. A. Tikhii, R. Golovashchenko, V. N. Derkach and S. I. Tarapov, Interaction of microwaves with superfluid flow in HeII, Low Temperature Physics. – V. 34, N. 4–5. – 2008. – P. 254–261.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2911649>

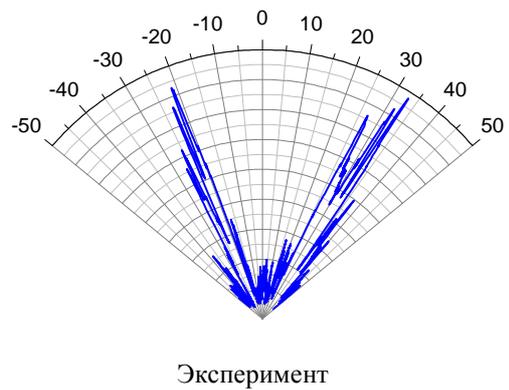
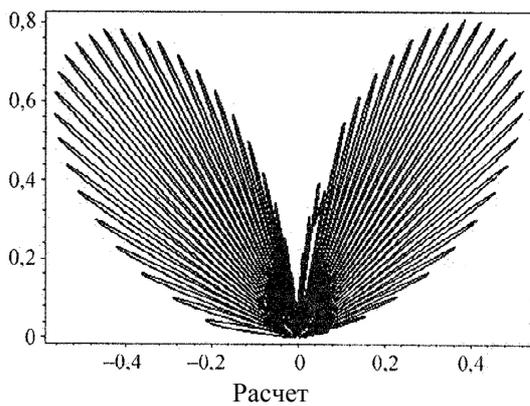
7. A. S. Rybalko, S. P. Rubets, É. Ya. Rudavskii, V. A. Tikhii, R. Golovashchenko, V. N. Derkach, S. I. Tarapov, "Interaction of microwaves with superfluid flow in HeII", *Low Temperature Physics*, 2008, Vol. 34, No. 4–5, pp. 254–261.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2911649>
8. Rybalko, E. Rudavskii, S. Rubets, V. Tikhii, V. Derkach, S. Tarapov, "Resonance microwave absorption in He II", *Journal of Low Temperature Physics*, 2008, Vol. 150, No. 3–4, , pp. 160–167.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10909-007-9529-0>
9. A. S. Rybalko, S. P. Rubets, É. Ya. Rudavskii, V. A. Tikhii, S. I. Tarapov, R. V. Golovashchenko, V. N. Derkach, "Microwave experiments in He II. New features of undamped superfluid flows", *Low Temperature Physics*, 2008, Vol. 34, No. 7, pp. 497–502.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2957000>
10. A. S. Rybalko, S. P. Rubets, E. Ya. Rudavskii, V. A. Tikhii, Yu. M. Poluectov, R. V. Golovachenko, V. N. Derkach, S. I. Tarapov, O. V. Usatenko, "Resonance excitation of single rotons in He II by an electromagnetic wave. Spectral line shape", *Low Temperature Physics*, 2009, Vol. 35, No. 11, pp. 837–842.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3266909>
11. A. Rybalko, S. Rubets, E. Rudavskii, V. Tikhii, Y. Poluectov, V. Derkach, R. Golovashchenko, S. Tarapov, O. Usatenko, "Microwave spectroscopy of condensed helium at the roton frequency", *Journal of Low Temperature Physics*, 2010, Vol. 158, No. 1–2, pp. 244–249.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10909-009-0025-6>
12. V. N. Derkach, R. V. Golovashchenko, A. S. Plevako, "Disk resonators for investigation of low-loss media characteristics in the millimeter waveband", 23rd Int. Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2013), September 8–14, 2013, Sevastopol, Crimea, Ukraine, Conference Proceedings, 2013, pp. 992–993.
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6653160>
13. P. В. Головащенко, В. Н. Деркач, С. И. Тарапов Микроволновые потери в слабопоглощающих алмазоподобных материалах при $1\text{ К} < T < 300\text{ К}$. Феноменологическое моделирование // *Радиофизика и электроника*. – 2015. – Т. 6(20), № 4. – С. 31–38.
URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/rphre_2015_6\(20\)_4_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/rphre_2015_6(20)_4_7)

3. Экспериментальное изучение спектральных характеристик полей дифракции на фрактальных и резонансных структурах

Ответственные: Деркач В. Н. (к.ф.-м.н.), Салогуб А. Н., Острижной Е. М.

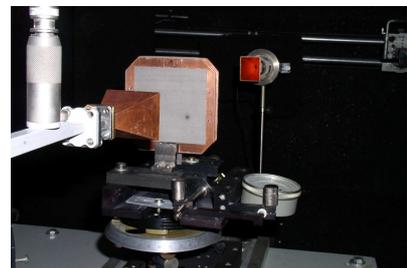
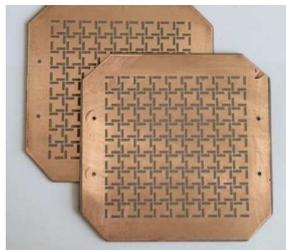
Результаты исследований

3.1. Проведен теоретический расчет параметров дофрактальных структур на основе математической теории самоподобных фракталов с использованием метода интегральных уравнений, численно-аналитического метода регуляризации Векуа-Карлемана и прямого метода механических квадратур. Исследованы дофрактальные дифракционные решетки второй стадии генерации.



Экспериментально измеренные диаграммы направленности прошедшей E-поляризованной электромагнитной волны качественно соответствуют результатам, полученным теоретически.

3.2. На основе теоретических исследований, проведенных в отделе вычислительной электродинамики, и экспериментальных исследований, проведенных нами, разработаны и созданы эффективные компактные поляризаторы электромагнитного излучения гигагерцевого и терагерцевого диапазонов частот, способные поворачивать угол поляризации излучения в полосе частот 10% от центральной, на произвольный заданный угол с потерями электромагнитной энергии не более 0,1 дБ. Показано, что композитные плоско-киральные двухслойные диафрагмы (КПКД) (в волноводном варианте) и решетки плоско-киральных двухслойных диафрагм (в лучеводном варианте и для свободного пространства) проявляют свойство гигантской «оптической активности» и приводят к повороту плоскости поляризации без изменения эллиптичности.



На основе КПКД могут быть созданы электрически- или магнито- управляемые поляризаторы с промежутком между КПКД, заполненным, например, ферритом, сегнетоэлектриком, пьезоэлектриком или мультиферроиком, частотно селективные и поляризационные фильтры и прочие устройства, которые могут найти применение в технике СВЧ и антенной технике. Показано также, что решетки КПКД обладают фокусирующим свойством и могут использоваться в качестве плоских линз.

Подробное изложение результатов представлено в публикациях:

1. В. Н. Деркач, Г.И. Кошевой, А.Н. Салогуб. Рассеяние волн миллиметрового диапазона длин волн на дофрактальных дифракционных решетках. 22-я Междунар. Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2012), материалы конф. – Севастополь : Вебер, 2012. – С. 833–834.
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6336212>
2. V. Derkach, A. Kirilenko, A. Salogub, S. Prikolotin, N. Kolmakova, Ye. Ostrizhnyi. Gigant optical activity in artificial plane-chiral structures. Proceedings of the 2013 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'2013), 21-26 June 2010, Kharkov, Ukraine, Paper W-33.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MSMW.2010.5546039>

3. Н. Деркач, А. А. Кириленко, А. Н. Салогуб, С. А. Приколотин, Н. Г. Колмакова, Е. М. Острижной. Преобразование поляризации двухслойной киральной структурой с гигантской оптической активностью. 23-я Междунар. Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2013) : материалы конф. – Севастополь: Вебер, 2013. – С. 994-995.
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6653161>
4. V. N. Derkach, A. A. Kirilenko, A. O. Perov, S. A. Prikolotin, A. M. Salogub. A giant 'optical activity' of composite plane-chiral irises at microwaves // Telecommunications and Radio Engineering. – 2014. – Vol. 73, No. 14. – P. 1219–1227.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1615/TelecomRedEng.v73.i14.10>
5. A. A. Kirilenko, N. G. Kolmakova (Don), A. O. Perov, S. A. Prikolotin, V. N. Derkach. Natural oscillations providing 90° polarization plane rotation by planar chiral double-slot irises // Radioelectronics and Communications Systems. – 2014. – Vol. 57, No. 12. – P. 521–530. DOI: <http://dx.doi.org/10.3103/S0735272714120012>
6. А. О. Перов, А. А. Кириленко, В. Н. Деркач, А. Н. Салогуб, Система двух экранов с круглыми запердельными отверстиями как квазиоптический поляризатор // Радиофизика и электроника. – 2015. – Т. 6(20), № 3. – С. 3-10.
URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/rphre_2015_6\(20\)_3_3](http://nbuv.gov.ua/UJRN/rphre_2015_6(20)_3_3)
7. N. Kolmakova, S. Prikolotin, A. Perov, V. Derkach, A. Kirilenko, Polarization plane rotation by arbitrary angle using D₄ symmetrical structures // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2016. – Vol. 64, No. 2. – P. 429–435.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TMTT.2015.2509966>